

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELAGEM DE UM SISTEMA DE CONTROLE
POR LÓGICA DIFUSA EMPREGADO NA
SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO DE
PRODUTOS CERÂMICOS**

OUTUBRO DE 1999

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELAGEM DE UM SISTEMA DE CONTROLE POR LÓGICA
DIFUSA EMPREGADO NA SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO DE
PRODUTOS CERÂMICOS**

TESE DE DOUTORADO

MILTON LUIZ HORN VIEIRA – M. Eng.

Orientador: FERNANDO OSCAR RUTTKAY PEREIRA – Ph. D.

Co-orientadora: INGEORG KÜHN – Dr^a. Eng.

Florianópolis, outubro de 1999

MODELAGEM DE UM SISTEMA DE CONTROLE POR LÓGICA DIFUSA EMPREGADO NA SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS

Doutorando: MILTON LUIZ HORN VIEIRA – M. Eng.

Esta tese foi julgada adequada para à obtenção do título de “DOUTOR EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

PROF. RICARDO MIRANDA BARCIA – Ph.D.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora:

PROF. FERNANDO OSCAR RUTTKAY PEREIRA – Ph.D.
Orientador

INGEBORG KÜHN – Dr^a. Eng.
Co-orientadora

MARCO ANTÔNIO C. CALDEIRA – Dr.
Membro

DACHAMIR HOTZA – Dr. Eng.
Membro

PAULO SMITH SCHNEIDER – Dr. Ing.
Membro

Florianópolis, outubro de 1999

À meus pais, Valdir e Eunice
À minha esposa, Raquel
À minha filha, Gabriella

AGRADECIMENTOS

Ao professor Fernando Oscar RuttKay Pereira, pelo incentivo, orientação e reconhecimento.

À professora Ingeborg Kühn, pela compreensão, co-orientação e incentivo.

Ao professor Dachamir Hotza, pela confiança, contribuição e entusiasmo.

Ao professor Marco Antônio C. Caldeira, pela confiança e entusiasmo.

Ao professor Paulo Smith Schneider, pelas valiosas sugestões e contribuições.

Ao professor Gilson Braviano, pelas valiosas sugestões.

À professora Vania Ribas Ulbricht pelas sugestões, incentivo e entusiasmo.

Aos colegas do Departamento de Expressão Gráfica pelo voto de confiança.

Aos amigos pela confiança e inspiração.

Aos colegas pelo compartilhamento dos problemas.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

A minha família pela resignação e compreensão nas horas em que necessitei estar afastado.

SUMÁRIO

1	Introdução	01
1.1	Importância do trabalho	01
1.2	Origem do Trabalho	03
1.2.1	A originalidade e as vantagens	06
1.3	Objetivos	06
1.3.1	Objetivo geral	06
1.3.2	Objetivos específicos	06
1.4	Desenvolvimento da pesquisa	07
1.5	Apresentação da pesquisa	08
2	Revisão bibliográfica	09
2.1	Procedimentos de fabricação	09
2.1.1	Preparo das matérias primas	11
2.1.2	Conformação da peça	12
2.1.3	Secagem	12
2.1.4	Esmaltação	13
2.1.5	Queima	13
2.1.6	Os defeitos no processo produtivo	17
2.2	O processo da atomização	24
2.2.1	Etapas do processo	25
2.2.1.1	Atomização do produto	25
2.2.1.2	Contato ar-atomizado	28
2.2.1.3	Secagem do atomizado	30
2.2.1.4	Separação do produto seco do ar	31
2.2.2	Efeito das variáveis de operação sobre as características do produto	32
2.2.2.1	Energia disponível para a atomização	33
2.2.2.2	Propriedades da barbotina	33
2.2.2.3	Vazão da barbotina	33
2.2.2.4	Projeto do sistema de atomização	33
2.2.2.5	Vazão de ar	33
2.2.2.6	Temperatura de secagem	33
2.2.3	Representação de atomizados	34
2.2.3.1	Terminologia	35
2.2.3.2	Métodos de representação de dados	35
2.2.4	Princípios da secagem	37
2.2.4.1	Ar úmido	37
2.2.4.2	Sólidos úmidos	44
2.2.4.3	Equilíbrio em dessecação	47

2.2.4.4	Cinética de secagem das gotas de atomização	51
2.2.4.5	Balanco de matéria e energia em atomizadores	52
2.2.4.6	Eficiência térmica	54
2.3	As equações que regem o processo de atomização	57
2.3.1	Transferência de calor e massa nas gotas	61
2.3.1.1	Velocidade relativa entre gota e gás desprezível	62
2.3.1.2	Efeitos da velocidade relativa	65
2.3.1.3	Efeitos dos sólidos dissolvidos	67
2.3.2	Produção e subsequente movimento das gotas para a corrente de gás	70
2.3.2.1	Atomização	70
2.3.2.2	Cálculo da trajetória da gota	71
2.3.3	Modelagem da secagem por atomização: Abordagens esboçadas na literatura	75
2.4	A lógica difusa no controle de equipamentos	78
2.4.1	A lógica difusa e o raciocínio aproximado	78
2.4.2	Algumas aplicações da lógica difusa	83
2.5	Introdução a teoria dos conjuntos difusos	85
2.5.1	Conceitos	85
2.5.2	Definições básicas	86
2.5.3	Estimativa de funções de pertinência	88
2.5.3.1	Método baseado em histogramas	89
2.5.3.2	Método baseado no consenso de especialistas	89
2.5.4	Raciocínio difuso	90
3	Secagem em laboratório	92
3.1	O equipamento	92
3.2	Procedimento experimental	93
3.2.1	Calibragem do orifício medidor de ar	93
3.2.2	O experimento de secagem	93
3.2.3	Apresentação dos resultados	94
3.2.4	Valores fixos	96
3.2.5	Formulas a serem utilizadas	96
3.3	Experimento com variação de vazão	97
3.3.1	Vazão 1	97
3.3.2	Vazão 2	98
3.3.3	Vazão 3	100
3.3.4	Vazão 4	101
3.3.5	Vazão 5	102
3.3.6	Vazão 6	104
3.3.7	Vazão 7	105
3.3.8	Material esférico	109
3.3.9	Material cilíndrico	110
3.3.10	Material plano	111
3.3.11	Comprovação dos resultados	118
4	Sistemas de controle	121
4.1	Sistemas clássicos de controle	121
4.2	Sistemas de controle difusos	123
4.2.1	A lógica difusa aplicada ao controle	124
4.2.2	Etapa da antecedentes	125
4.2.3	Ponderação das regras	127
4.2.4	Etapa de conseqüentes	128
4.3	Exemplo de um projeto	131

4.4	Como caminha a lógica difusa nos diversos campos de aplicação	135
4.4.1	Aplicações clássicas	135
4.4.2	Aplicações diversas	136
4.4.3	Bases de dados relacionais difusas	137
4.4.4	Aplicações ao projeto assistido por computador	138
5	A modelagem do sistema de controle do atomizador	141
5.1	Procedimento de fabricação proposto	141
5.1.1	Descrição do procedimento de modelagem	142
5.1.2	Regras difusas a serem empregadas na modelagem da solução	143
5.2	Definição das variáveis	145
5.3	O software empregado na demonstração da solução	150
5.4	O aplicativo desenvolvido com HP VEE para a solução	152
6	Conclusões e Encaminhamentos	158
6.1	As limitações do processo	159
6.2	Proposta de implementação	160
6.3	Resultados	161
6.4	Sugestões	162
	Referências Bibliográficas	163
	Anexo 1	170

LISTA DE FIGURAS

Figura nº:	Página nº:
01 - Desenho esquemático do sistema de controle do processo de secagem por atomização.....	05
02 - Desenvolvimento da pesquisa.....	07
03 - Fluxograma esquemático da produção de cerâmica.....	09
04 - Esquema do processo de fabricação para um produto de monoqueima.....	10
05 - Ciclo de monoqueima.....	14
06 - Diagrama de “causa – efeito” para o defeito denominado de “fenda pontual”	19
07 - Diagrama de “causa – efeito” para o defeito denominado de “Desfolhado”	21
08 - Diagrama de “causa – efeito” para o defeito denominado de “Fora de Esquadro”	22
09 - Diagrama de “causa – efeito” para o defeito denominado de “Fendas”	23
10 - Diagrama de “causa–efeito” para o defeito denominado de “Pegados ao Molde” e “Reprensados”	23
11 - Etapas da secagem por atomização.....	25
12 - Esquema de uma instalação de secagem por atomização.....	26
13 - Conjunto atomizador a disco centrífugo, com um disco atomizador na forma de um prato invertido.....	27
14 - Discos atomizadores próprios para diversas aplicações.....	27
15 - Bico de pressão a um só fluido	28
16 - Contato ar-atomizado.....	28
17 - Distribuição de temperatura em diversos tipos de atomizadores	29
18 - Sistemas de recuperação de produto.....	31
19 - Esquema de uma planta de atomização.....	32
20 - Intervalo granulométrico obtidos em operações de secagem por atomização.....	34
21 - Distribuição do tamanho de partículas representada na forma de um histograma.....	36

Figura n°:	Página n°:
22 - Curvas de distribuição granulométrica.....	36
23 - Representação de α em relação a velocidade.....	44
24 - Representação da curva de equilíbrio.....	47
25 - Variação da umidade de equilíbrio com a umidade relativa do ar.....	48
26 - Curvas de equilíbrio.....	49
27 - Representação da curva definida pela equação 31 e da respectiva curva experimental.....	50
28 - Características da secagem das gotas durante a atomização.....	51
29 - Dados de secagem para o cálculo dos balanços de matéria e de energia.....	52
30 - Formas de introdução do ar nos secadores <i>concorrentes</i> de atomização.....	58
31 - Formas de introdução do ar nos secadores <i>contracorrente</i>	58
32 - Criação de gotas pelo acréscimo de energia em uma grande esfera de líquido.....	59
33 - Efeito do tamanho da gota na área de superfície total.....	60
34 - Os padrões de fluxo obtidos quando uma gota esférica.....	65
35 - Transferência de calor e massa para e de uma gota em uma corrente de gás aquecido.....	66
36 - A estrutura da partícula associada a uma taxa baixa de transferência de calor.....	67
37 - A estrutura da partícula associada a uma alta taxa de transferência de calor.....	69
38 - O efeito da alta taxa de transferência de calor em um material com baixa plasticidade.....	69
39 - As forças atuando na gota esférica em um fluxo de gás em contracorrente.....	72
40 - Coeficiente de arraste – correlação com o número de Reynolds.....	72
41 - Esquema de equipamento utilizado na execução do ensaio de secagem.....	92
42 - Representação para cálculo da inclinação do manômetro.....	94
43 - Representação gráfica dos logaritmos $\ln h = \ln \Delta h_m$ e $\ln F = \ln (q_G * ((P_b * M) / T_0)^{1/2})$	96
44 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 1.....	98
45 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 2.....	99
46 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 3.....	101
47 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 4.....	102
48 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 5.....	103
49 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 6.....	105
50 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 7.....	106

Figura n°:	Página n°:
51 - Representação gráfica da perda de peso na secagem.....	107
51 ^a - Representação logarítmica dos valores obtidos na tabela 12.....	108
52 - Corpo cilíndrico onde a difusão da água ocorre somente em uma direção.....	110
53 - Representação das laminas paralelas com espessura 2L.....	111
54 - Forma da representação gráfica referente a equação (129).....	112
55 - Representação do $\ln(D/R^2)$ em relação a $1/T$	115
56 - Representação do $\log(D/L^2; D/R^2)$ em relação a variável $1/T$	117
57 - Gráfico para a temperatura de 70 °C (experimental e teórico).....	120
58 - Esquema básico de um sistema de controle realimentado.....	122
59 - Esquema geral de um Controlador digital.....	123
60 - Representação gráfica de um antecedente.....	126
61 - Antecedente como variável piramidal.....	127
62 - Ações de um conseqüente.....	129
63 - Truncamento de uma conseqüente.....	130
64 - União das conseqüentes.....	130
65 - Conjunto de funções de pertinência para controle.....	133
66 - Exemplo de uma árvore de inferência para um tipo de resposta.....	143
67 - Definição das regras para a umidade.....	148
68 - Definição das regras para a temperatura.....	148
69 - Geradores de valores para umidade, temperatura, vazão média de ar e barbotina.....	153
70 - O SEQUENCER "Verifica valor da Umidade e informa Nova Temperatura"	154
71 - Os SEQUENCER que verificam o valor da Umidade e da Temperatura e informam.....	154
72 - Visualização do aplicativo antes da sua execução.....	155
73 - Visão do usuário do aplicativo antes da sua execução.....	156
74 - Visão do usuário do aplicativo após sua execução.....	156
75 - Visualização do aplicativo após sua execução.....	157

RESUMO

Este trabalho tem sua origem em pesquisas que tentaram viabilizar uma migração de dados do processo de atomização obtidos a nível laboratorial e unidade piloto para a escala industrial. Tais tentativas não obtiveram o sucesso almejado em função principalmente do excesso de parâmetros que necessitam ser controlados na secagem por atomização. Novos ensaios foram realizados, em parceria com o centro de pesquisas da A.I.C.E. (Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas) da Universidade de Valencia na Espanha. Nos quais foram obtidos resultados semelhantes aos anteriormente constatados, ou seja, existe uma grande dificuldade em comparar dados obtidos pelo processo de atomização no nível laboratorial, unidade piloto e industrial. E um dos prováveis motivos reside na dificuldade de realizar controles na unidade industrial de atomização, já que esta trabalha sobre uma base fundamentalmente empírica para o controle de seus processos. As empresas do setor cerâmico enfrentam problemas extremamente complexos quando procuram realizar uma produção praticamente uniforme. Com objetivo de minimizar tais problemas e favorecer uma maior uniformidade do produto, é proposto um sistema de controle para a secagem por atomização empregando a lógica difusa com fator de tomada de decisão em fluxo contínuo. Este sistema de controle utiliza um aplicativo desenvolvido em HP VEE para realizar a aquisição de dados, processar estes dados utilizando a lógica difusa, e com estes resultados controlar as ações no secador. Com o emprego deste tipo de controle é esperado que ocorram: ganhos energéticos significativos, pela otimização do controle de temperaturas; tempos menores de armazenagem para homogeneização do produto, para garantir a uniformidade do produto atomizado; redução substancial de tempos de produção, uma vez que existe a uniformidade de umidade no produto, este necessitará apenas uniformizar a umidade no interior do grânulo repercutindo em tempos menores de estocagem.

ABSTRACT

This study has its origin in research that has set out to make viable a migration of data from the atomization process obtained on the laboratory level and pilot unit to the industrial scale. These attempts did not attain the desired success, mainly due to the excess of parameters that need to be controlled in drying by atomization. New essays were carried out, in partnership with the research center of A.I.C.E.. (Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas) of the University of Valencia in Spain. Here similar results to the previous ones were obtained, since there exists considerable difficulty in comparing the data obtained by the process of atomization on the laboratory level, in the pilot unit and in industry. And one of the probable reasons lies in the difficulty in carrying out controls in the industrial unit of atomization, inasmuch as this unit works on a fundamentally empirical basis for the control of its processes. Firms in the ceramic sector face extremely complex problems when they set out to maintain a nearly uniform production. In order to minimize such problems and favor a greater uniformity of product, a control system is proposed for drying by atomization, employing diffuse logic with a factor of decision-making in continuous flux. This control system utilizes a computer application developed in HP VEE to acquire the data, to process the data utilizing diffuse logic, and with these results, to control the actions in the dryer. With the utilization of this type of control, the following advantages can be expected: significant energy gains, through optimizing temperature control; shorter storage time for the homogenization of the product to guarantee the uniformity of the atomized product; substantial reduction of the production time, since there is uniformity in the humidity of the product inside the granule, resulting in a shorter stocking time.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Na atualidade, a competitividade de um produto está fundamentada principalmente em

critérios de preço e qualidade. Como inferência disto, a gestão da produção caminha, cada vez mais, no sentido de obter a máxima qualidade e confiabilidade, tanto no produto acabado como no seu processo de fabricação. Esta conscientização, somada ao aumento de experiência na aplicação de métodos de controle de qualidade, tem levado o setor empresarial a considerar os importantes benefícios econômicos que podem originar da aplicação de um oportuno programa de controle de qualidade, baseado na identificação, análise e solução de problemas.

Com a finalidade de contribuir na melhora da qualidade nas indústrias de pavimento e revestimento cerâmico, ao longo deste labor, foi realizado uma ampla avaliação do processo de atomização (identificação do problema) que é parte integrante do ciclo de produção empregado nas indústrias cerâmicas. Este processo, que é uma etapa de secagem realizada após a cominuição (moagem) e homogeneização da massa cerâmica (formada por argilas que são misturadas a outros elementos, como por exemplo: água, aditivos, etc.) que deve conter características, que são definidas pelo tipo de produto à ser obtido. Esta etapa tem por finalidade capital conferir ao produto características físicas de transporte e perfeito preenchimento da matriz de compactação. São estudadas as causas que podem originar defeitos de fabricação (análise) e são propostas ações para evitar ou restringir a sua formação (solução do problema).

Convém salientar que, em determinadas ocasiões, uma imperfeição de fabricação pode ser consequência da ocorrência de uma série de fatores, razão pela qual, um mesmo defeito pode ser originado por diferentes motivos, bastando que ocorram determinadas coincidências.

O desenho impreciso, o material defeituoso, o defeito que se deixa passar, a medição incorreta, etc., levam a que determinados produtos percam valor (produtos de segunda linha) ou tenham que ser descartados ou reprocessados. Estes produtos descartados foram fabricados consumindo materiais, energia térmica e elétrica, além dos recursos humanos. Ou seja, possuem custo exatamente igual aos que foram considerados aceitáveis (Albaro et al; 1991). Toda esta energia foi desperdiçada com uma dissipação de trabalho, matéria prima e tempo.

Para Juran (1988), a qualidade incrementa a produtividade, aumenta a cota de mercado e prestigia a imagem da marca. Porém, é certo que a qualidade tem um custo, mas os benefícios que com ela são logrados superam amplamente este custo, sempre que exista uma boa adequação ao uso do produto.

Desta forma, o que está descrito acima constitui um exemplo de perdas que podem ser facilmente calculadas, mas existem outros custos, os da “não qualidade” ocultos. As perdas

ocasionadas pelos produtos defeituosos, são importantes para a fábrica, mas são ainda mais transcendentais para os consumidores, em função da forma de insatisfação, reparações, tempos sem serviço, etc.

A qualidade exerce um papel fundamental na imagem do produto e na da empresa que o fabrica. Esta imagem é construída ao longo do tempo, em função de oferecer um bom produto com características uniformes, pelo qual a vigilância da qualidade, além de eficaz, deve ser contínua.

O controle de qualidade do material é imprescindível para a indústria produtora de artigos cerâmicos, já que para subjugar de uma forma mais efetiva o mercado é necessário ter sob controle a própria produção. O produto que é obtido em um processo contínuo de fabricação não é exatamente uniforme, já que existem uma série de fatores, dificilmente elimináveis, que o impedem. Não obstante, quando for possível realizar um controle rigoroso do processo, fazendo com que as características do produto sofram alterações dentro de um intervalo de tolerância suficientemente reduzido, este pode ser considerado “praticamente uniforme”.

Portanto, o controle de qualidade é considerado como um esforço contínuo e sistemático encaminhado a corrigir os desvios do processo de fabricação do programa fixado, logrando assim manufaturar produtos cujas características estão dentro dos limites de tolerância preestabelecidos, a um custo o mais baixo possível (Vieira, 1991).

No caso do controle do processo aplicado à secagem por atomização na indústria cerâmica, objeto desta pesquisa, é uma necessidade que a aquisição de dados seja realizada durante todo o ciclo produtivo. Estes dados possuem duas utilizações, uma imediata e outra a longo prazo. O efeito imediato desta aquisição é a possibilidade de intervir rapidamente cada vez que o ciclo produtivo não se comporta conforme as especificações exigidas, intervenção que permite reduzir as perdas e, portanto, uma diminuição do custo unitário de produção. No caso do controle a longo prazo, os dados coletados não devem ser descartados, mas sim utilizados para constituir a “memória técnica” da empresa, enriquecendo seu patrimônio técnico e intelectual. O qual representa uma base partida imprescindível para a criação de inovações tecnológicas e é estratégico para os que querem ter uma produção de vanguarda.

Tais controles podem ser separados em duas categorias (Jarque et al, 1990): os que podem ser efetuados na planta e os que, pelo contrário, necessitam um laboratório.

Os primeiros devem ser efetuados com uma frequência periódica elevada, com a finalidade de poder intervir e modificar os parâmetros de produção de acordo com o resultado

obtido através do mesmo controle.

Com este propósito, as tecnologias modernas estão evoluindo para a gestão automatizada da produção, mediante aos dispositivos de medição (termopares, pirômetros, câmaras digitais, presostatos, etc.), associados a processos analógicos ou digitais que, diretamente ou sobre o controle de um processador central, estão em condições de avaliar o parâmetro medido e assinalar os ajustes necessários.

Desta forma, fica manifesto a necessidade de que novos métodos de controle aumentem a qualidade dos produtos e reduzam a insatisfação dos consumidores. Ressalta-se ainda que, na atualidade, o controle do processo de atomização é realizado somente a nível laboratorial e com uma frequência muito baixa, o que gera a necessidade de uma etapa demasiadamente longa de homogeneização da umidade da massa em silos de estocagem. Esta etapa é de fundamental importância para que o produto venha a ter as características necessárias à sua utilização nas prensas isostáticas.

1.2 ORIGEM DO TRABALHO

Este trabalho tem sua origem em pesquisas realizadas para a dissertação de mestrado intitulada: "Otimização de Massas Cerâmicas Grés Utilizando a Metodologia Taguchi" realizada na Universidade Federal de Santa Catarina (curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica), entre os anos de 1989 e 1991 junto a laboratórios de pesquisas e indústrias cerâmicas (Vieira, 1991). Durante estas pesquisas procurou-se viabilizar uma migração dos dados do processo de atomização obtidos a nível laboratorial e unidade piloto para a escala industrial. Tais tentativas não obtiveram o sucesso almejado em função principalmente do excesso de parâmetros que necessitavam ser controlados.

Novos ensaios foram realizados, para fundamentar este trabalho, em parceria com o centro de pesquisas da A.I.C.E. (Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas) da Universidade de Valencia na Espanha. Nos quais foram obtidos resultados semelhantes aos anteriormente constatados, ou seja, existia uma grande dificuldade em comparar dados obtidos pelo processo de atomização a nível laboratorial, unidade piloto e industrial. E um dos prováveis motivos residia na dificuldade de realizar controles na unidade industrial de atomização, já que esta trabalha sobre uma base fundamentalmente empírica para o controle de seus processos, tendo como objetivo uniformizar o produto obtido.

As empresas do setor cerâmico enfrentam problemas extremamente complexos quando procuram realizar uma produção praticamente uniforme. Com objetivo de minimizar tais

problemas e favorecer uma maior uniformidade do produto, é proposta a modelagem de um sistema de secagem por atomização empregando a lógica difusa com fator de tomada de decisão em fluxo contínuo.

Para facilitar a compreensão do processo, a seguir é feita uma breve descrição de como este ocorre e de como deverá ser empregado o controle difuso.

O controle de um processo de atomização na atualidade está baseado em 4 (quatro) pontos principais (controle da temperatura de entrada do gás de secagem; controle da vazão do fluido a ser secado; controle de umidade do produto secado, e controle da granulometria do produto secado) que são controlados manualmente por um operador. Sendo que, nos dois últimos itens são realizadas aferições de hora em hora, nas trocas de turno ou por iniciativa do próprio operador. Os dois primeiros itens são ajustados em função dos valores obtidos dos dois últimos.

Para a realização de controles é necessário que sejam aplicados alguns ensaios. Assim, no controle da temperatura de entrada do gás de secagem é realizada a verificação da temperatura utilizando-se termopares. No controle da vazão do fluido a ser secado é realizada a verificação pelo controle de vazão da bomba de recalque. No controle de umidade do produto secado é realizada a verificação de sua umidade, através de amostras coletadas na saída do atomizador, por perda de peso ou controle de água presente na amostra. No controle da granulometria do produto secado é realizada uma verificação de sua granulometria, por peneiramento seletivo de amostra coletada.

O controle do processo de atomização esta exemplificado de forma esquemática na figura 1; onde estão presentes os principais componentes necessários para a operação e controle do secador por atomizador.

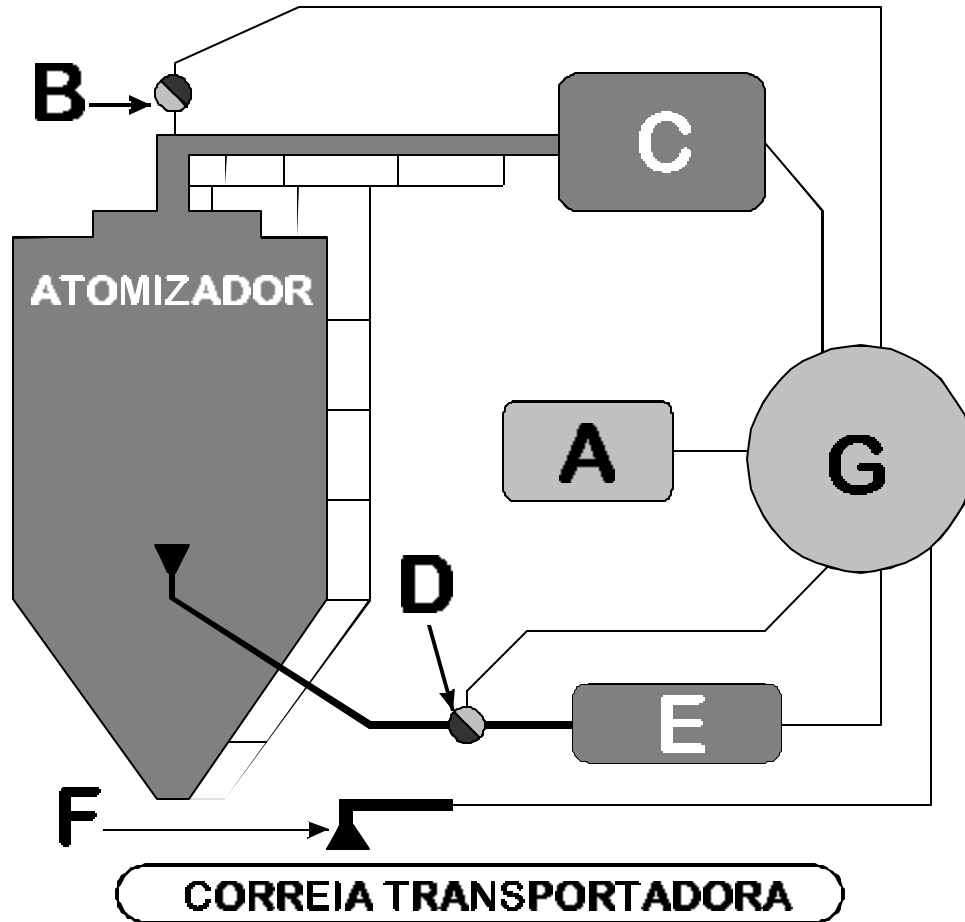


Figura 1 – Desenho esquemático do sistema de controle do processo de secagem por atomização

Legenda:

- A. Termopares colocados em pontos estratégicos ao longo do percurso, para verificar as oscilações de temperaturas ao longo do equipamento;
- B. Equipamento para medir a vazão dos gases aquecidos;
- C. Equipamento para controlar a vazão/emissão do gás de aquecimento;
- D. Equipamento para medir a vazão do fluido a ser atomizado;
- E. Equipamento para controlar a vazão do fluido colocado após a bomba de recalque (ou após os filtros, caso existirem);
- F. Equipamento para análise "on-line" de umidade do produto secado na unidade de atomização;

G. Microprocessador com condições de analisar os dados emitidos pelos equipamentos, e ao mesmo tempo poder exercer um controle efetivo sobre o processo, em função de padrões pré-definidos pela lógica difusa.

1.2.1 A ORIGINALIDADE E AS VANTAGENS:

A ORIGINALIDADE/NOVIDADE DESTES TRABALHOS RESIDE NÃO SÓ NO FATO DE QUE, APESAR DE ESTARMOS UTILIZANDO EQUIPAMENTOS EXISTENTES NO MERCADO, ESTES NÃO FORAM AINDA AGRUPADOS PARA GERENCIAR O FUNCIONAMENTO DE UM ATOMIZADOR, MANTENDO TODOS OS PARÂMETROS DE PRODUTO E PROCESSO SOBRE ESTREITA VIGILÂNCIA E CONTROLE. MAS TAMBÉM NO EMPREGO DA FERRAMENTA DENOMINADA DE CONTROLE DIFUSO, QUE É UM MODO DE DEFINIR AO CONTROLADOR UM CONJUNTO DE REGRAS LINGÜÍSTICAS. UM CONTROLE NESTES MOLDES ACARRETERÁ EM GANHOS ENERGÉTICOS SIGNIFICATIVOS, EM REDUÇÃO SUBSTANCIAL DE TEMPOS DE PRODUÇÃO, EM TEMPOS MENORES DE ARMAZENAGEM PARA HOMOGENEIZAÇÃO DO PRODUTO, ENTRE OUTROS MOTIVOS QUE SE POSSA CITAR.

A UTILIZAÇÃO DO CONTROLE DIFUSO, PARA ESTE TIPO DE EQUIPAMENTO, RESIDE NOS SEGUINTE FATOS: NÃO FOI POSSÍVEL OBTER UM MODELO MATEMÁTICO QUE FUNCIONE A CONTATO (EXCESSO DE SIMPLIFICAÇÕES DISTORCEM O RESULTADO FINAL); CERTAS PARTES DO SISTEMA A CONTROLAR SÃO DE DIFÍCIL AVALIAÇÃO (PROCESSO FÍSICO) COM MEDIDAS POUCO CONFIÁVEIS (ERROS E TOLERÂNCIA); PRESENÇA DE VÁRIAS INCERTEZAS (MODELO EMPÍRICO DE CONTROLE); MESMO SENDO ESTE UM SISTEMA COMPLEXO E NÃO EXISTINDO UM MODELO PARA O SEU CONTROLE, O COMPORTAMENTO DO OPERADOR É EXPRESSADO LINGÜÍSTICAMENTE, NA FORMA DE CONDIÇÕES E AÇÕES; EXISTEM PROCESSOS DE “AJUSTE – DESAJUSTE”: UMA AÇÃO DE CONTROLE PODE INDIRETAMENTE DESAJUSTAR UM PARÂMETRO ESTÁVEL ANTERIORMENTE.

É INTERESSANTE TAMBÉM RESSALTAR QUE ESTE TIPO DE CONTROLE NOS FORNECE VANTAGENS DO TIPO: TEMPO DE FORMAÇÃO DE PESSOAL DE PROJETO DE CONTROLADORES É MUITO CURTO, ALÉM DE NÃO EXISTIR A NECESSIDADE DE UM DOMÍNIO PROFUNDO DOS FUNDAMENTOS TEÓRICOS; NÃO NECESSITA DE UM MODELO MATEMÁTICO PRECISO DO ENTE A CONTROLAR; OS CONTROLADORES DIFUSOS ALCANÇAM, EM MUITAS APLICAÇÕES, MAIS RÁPIDO A ESTABILIDADE NAS ETAPAS TRANSITÓRIAS; ALTA TOLERÂNCIA AO RUÍDO E A VARIAÇÕES DO SISTEMA CONTROLADO; FACILMENTE RECONFIGURÁVEIS, AGREGANDO OU RETIRANDO REGRAS.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

CONCEBER UM MODELO QUE, EMPREGANDO A LÓGICA DIFUSA, AUTOMATIZE O CONTROLE DE UM SECADOR POR ATOMIZAÇÃO, DE EMPREGO COMUM EM INDÚSTRIAS CERÂMICAS.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- REALIZAR O DIAGNÓSTICO DO PÓ ATOMIZADO EM FLUXO CONSTANTE;
- GERAR PARÂMETROS DE CONTROLE PARA OPERAÇÃO DO ATOMIZADOR;
- TRANSFERIR OS FATORES EMPÍRICOS NO CONTROLE DO SECADOR POR ATOMIZAÇÃO PARA A BASE DE DADOS.

1.4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA É DETALHADO NA FIGURA 2, E A FORMA DE FLUXOGRAMA UTILIZADA COMO REPRESENTAÇÃO TEM POR OBJETIVO A RÁPIDA COMPREENSÃO DA SUA EVOLUÇÃO.

A FIGURA 2 PROCURA REPRESENTAR A ABORDAGEM ADOTADA PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO DE PESQUISA. A FASE INICIAL FOI A IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA SEGUIDA, CONCOMITANTEMENTE, DOS ENSAIOS DE AVALIAÇÃO QUE TINHAM POR OBJETIVO CONSTATAR A NECESSIDADE DA PESQUISA, E DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ONDE FOI FEITO UM COMPLETO LEVANTAMENTO DOS TRABALHOS PUBLICADOS SOBRE A SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO E SOBRE A LÓGICA DIFUSA APLICADA AO CONTROLE DE PROCESSO.

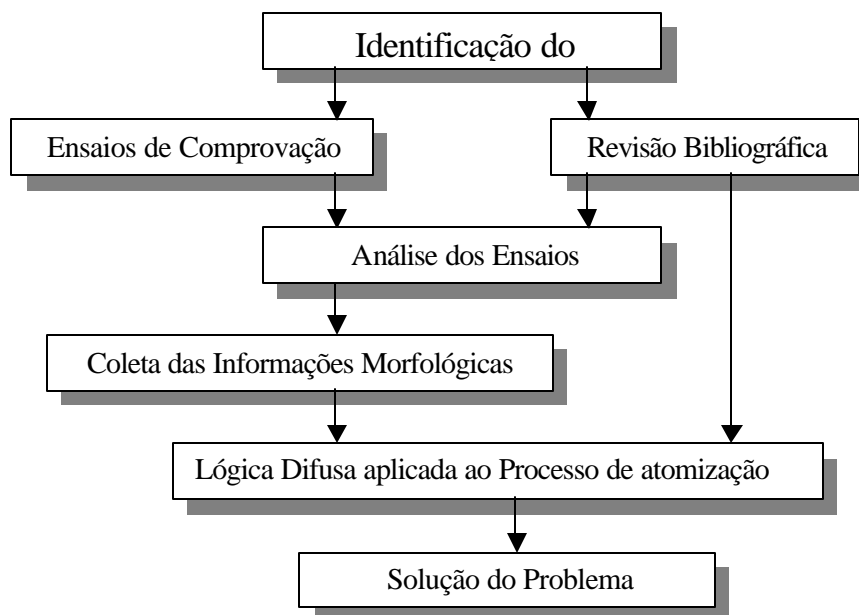


Figura 2 – Desenvolvimento da pesquisa

NA FASE DE ANÁLISE DOS ENSAIOS É AVALIADA A POSSIBILIDADE DO EMPREGO DA LÓGICA DIFUSA NESTE TIPO DE PROCESSO, NESTE PONTO TAMBÉM É CONSIDERADO O EMPREGO DA LÓGICA CONVENCIONAL COMO FORMA DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA.

NA FASE DA COLETA DAS INFORMAÇÕES MORFOLÓGICAS, FORAM LEVANTADOS OS DADOS EMPÍRICOS EMPREGADOS NOS SETORES DE PRODUÇÃO E DE CONTROLE DA ETAPA DE SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO.

NA FASE ONDE A LÓGICA DIFUSA É APLICADA AO PROCESSO DE SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO SÃO AGRUPADAS E TRATADAS TODAS AS INFORMAÇÕES ORIUNDAS DAS FASES ANTERIORES PARA, NA FASE SEGUINTE, SER APRESENTADA UMA SOLUÇÃO DO PROBLEMA.

1.5 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

O PRÓXIMO CAPÍTULO (CAPÍTULO 2) INICIA COM UMA VISUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS, COM UMA EXPLICAÇÃO SUCINTA SOBRE CADA UMA DAS ETAPAS PRINCIPAIS. A SEGUIR É FEITA UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO EMPREGADO NAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS. A SEGUIR ESTÃO DETALHADAS E DEMONSTRADAS AS EQUAÇÕES QUE REGEM A OPERAÇÃO DE SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO. DANDO ÊNFASE A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NAS GOTAS, A SUA PRODUÇÃO E SUBSEQÜENTE MOVIMENTO PARA A CORRENTE DE GÁS E CONCLUINDO COM AS ABORDAGENS ESBOÇADAS NA LITERATURA SOBRE A MODELAGEM DA SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO. PARA COMPLEMENTAR, É REALIZADA UMA BREVE ABORDAGEM SOBRE A LÓGICA DIFUSA, DA SUA INTERAÇÃO COM O RACIOCÍNIO APROXIMADO E INCLUINDO ALGUMAS APLICAÇÕES DA LITERATURA. É APRESENTADA A TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS PARA FUNDAMENTAR A SUA APLICAÇÃO EM UM MODELO.

NO CAPÍTULO 3 SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS TEÓRICOS E OS DADOS OBTIDOS NA PRÁTICA. DEMONSTRANDO A DIFICULDADE QUE EXISTE NA MODELAGEM TEÓRICA EM DETERMINAR PADRÕES PARA UMA APLICAÇÃO EFETIVA NO SETOR INDUSTRIAL ATUAL.

NO CAPÍTULO 4 É DELINEADA A ABORDAGEM QUE EMPREGA A LÓGICA DIFUSA NO CONTROLE DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO, DEFININDO OS PARÂMETROS E AS BASES NECESSÁRIAS PARA QUE POSSAM SER ALCANÇADOS OS OBJETIVOS FINAIS.

NO CAPÍTULO 5 É APRESENTADO A MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE DO ATOMIZADOR, O SOFTWARE EMPREGADO NO SEU DESENVOLVIMENTO E O APLICATIVO DE CONTROLE DO PROCESSO.

No CAPÍTULO 6 ESTÃO APRESENTADAS AS CONCLUSÕES E OS ENCAMINHAMENTOS FUTUROS QUE ESTE TRABALHO PODE OCASIONAR

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCEDIMENTOS DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação de produtos cerâmicos tradicionais se desenvolve normalmente em três fases sucessivas (figura 3): preparo das matérias primas; conformação da peça; tratamentos para conferir ao produto as propriedades finais desejadas, após submetê-lo à queima, uma ou mais vezes.

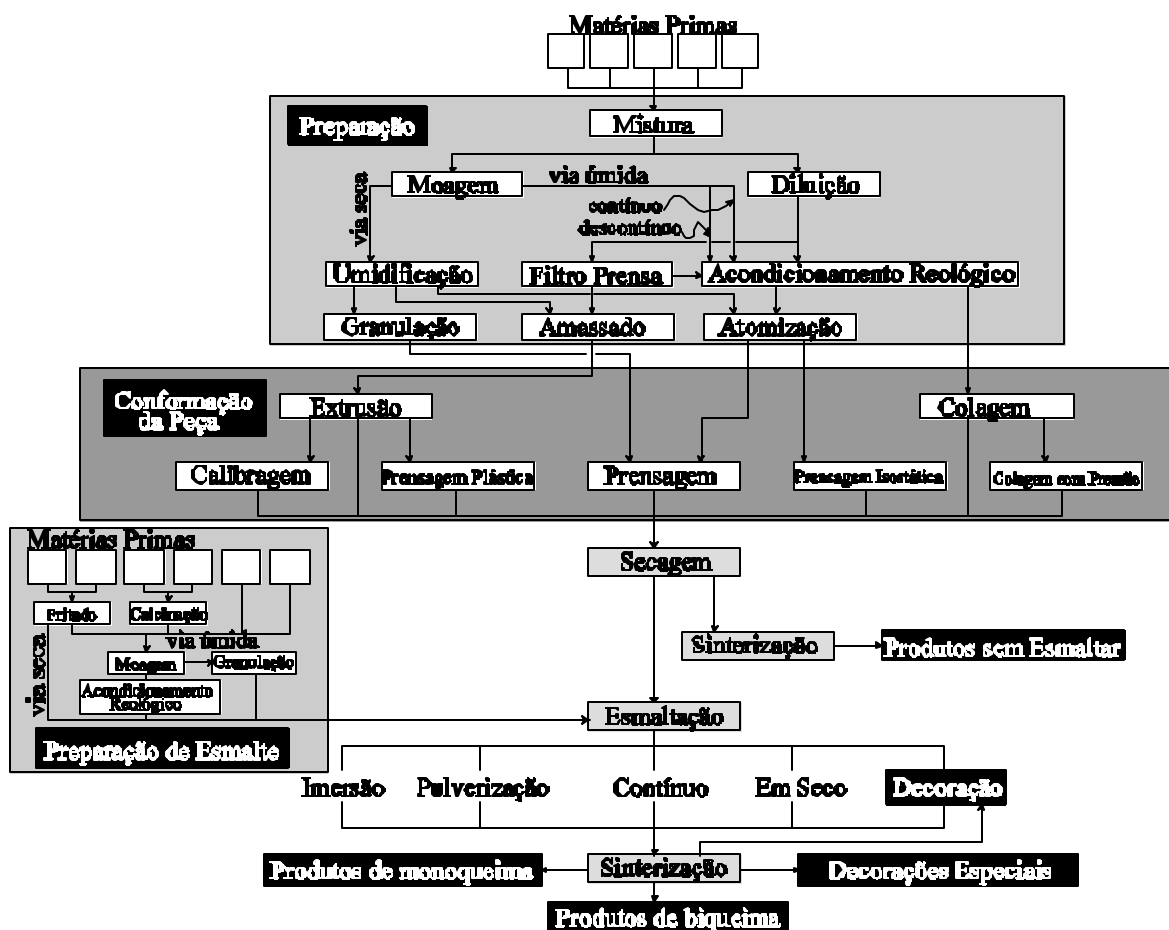


Figura 3 – Fluxograma esquemático da produção de cerâmica

As fases do processo de fabricação que se desenvolvem sequencialmente depois da prensagem são: secagem, esmaltação e decoração das peças e a queima. Em função do produto a fabricar, esmaltado ou não, podendo ainda optar por um procedimento de monoqueima, biqueima ou terceira queima.

A fabricação de revestimentos cerâmicos esmaltados de baixa porosidade (pavimento gresificado) é realizado por monoqueima, isto é, realizando-se uma só queima do suporte junto com o esmalte, tal como o indicado na figura 4.

O processo de fabricação de pavimentos gresificados por monoqueima compreende as seguintes etapas: Preparação da composição a ser utilizada; Prensagem; Secagem; Esmaltação; Queima; Seleção ou Classificação; Embalagem.

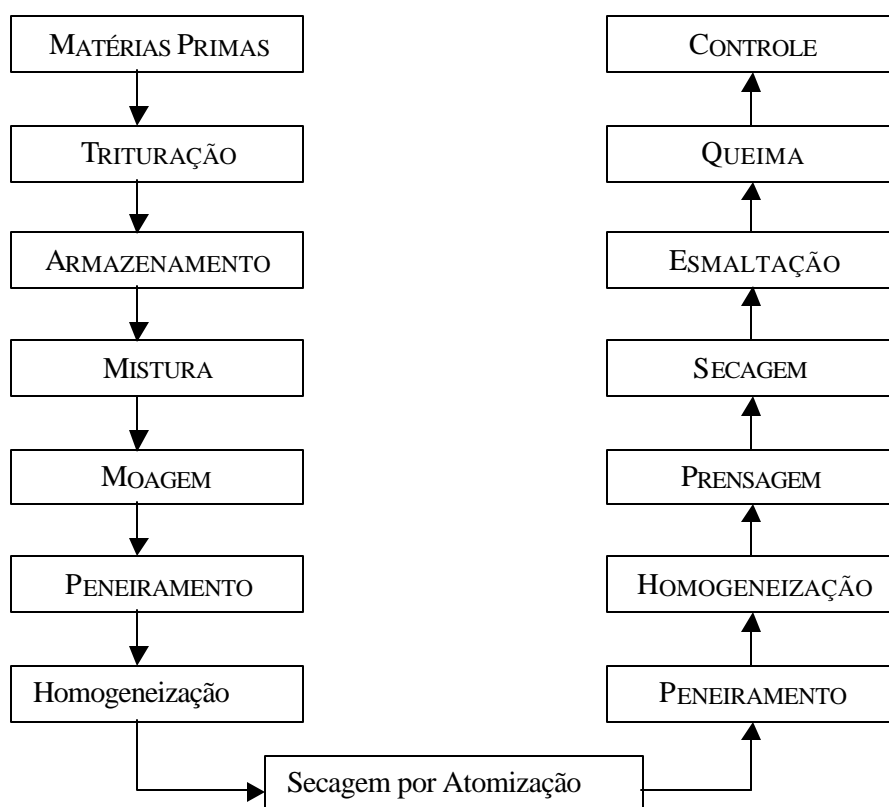


Figura 4 – Esquema do processo de fabricação para um produto de monoqueima.

2.1.1 PREPARO DAS MATÉRIAS PRIMAS

O preparo das matérias primas é o ponto inicial de um trabalho consistente na obtenção de qualidade em uma indústria cerâmica. Como já foi tratado de uma forma sucinta no capítulo 1, neste tópico será abordado de uma forma mais aprofundada, porém somente após a entrada destes no pátio da unidade fabril. Como objetivos específicos desta fase pode-se citar: o de preparar uma mistura íntima e homogênea dos distintos componentes, com uma determinada granulometria; e o acondicionamento desta mistura para a adequada moldagem da peça.

Esta etapa do processo pode ser realizada por "via úmida" ou por "via seca". A "via úmida" é o processo empregado pela maioria das indústrias cerâmicas que fabricam pavimentos gresificados. E como consequência disto, neste trabalho, adotar-se-á este processo como padrão para descrever o procedimento de fabricação de produtos cerâmicos.

As diferentes partidas de uma mesma argila que participam da composição final são misturadas previamente e estocadas a céu aberto ou em silos, para que estas atinjam uma perfeita homogeneização do lote de trabalho.

Posteriormente, estas argila são trituradas até um tamanho de aproximadamente 30mm e transportadas para os seus respectivos silos. A mistura destas, que é realizada por dosificação gravimétrica, mediante básculas instaladas na parte inferior dos silos, é introduzida nos moinhos de bolas que em seguida recebe água e defloculantes na proporção adequada. O conteúdo de sólidos desta mistura, denominada de barbotina, varia normalmente entre 65 e 70%, dependendo das características das matérias primas empregadas.

Quando a barbotina atinge a granulometria desejada (normalmente utiliza-se o rechaço da barbotina à $60\mu\text{m} < 10\%$ em peso de sólido seco), o moinho de bolas é esvaziado e a barbotina resultante passa por uma peneira vibratória para que seja eliminada qualquer partícula ou fragmento superior aos $125\mu\text{m}$ de tamanho. Esta barbotina é então armazenada nas balsas de agitação, denominadas de "vascas", onde ocorre a homogeneização com as suspensões já peneiradas provenientes de outras moagens.

A secagem por atomização transforma a suspensão em aglomerados esféricos ociosos de partículas (grânulos) com umidade controlada, mais adequados para a prensagem. Este material é armazenado em silos, com o objetivo de uniformizar a umidade no interior de cada grânulo e entre os grânulos de distintos tamanhos. O tempo de permanência do atomizado nos silos não é inferior a 48 horas.

Imediatamente antes da prensagem, o atomizado é peneirado em uma peneira

vibratória com uma luz de malha de 1000µm. Tal procedimento tem como objetivo eliminar as possíveis impurezas de grande tamanho que podem ser introduzidas durante o processo (pedaços de madeira, pintura dos silos, etc.) e os aglomerados de grande tamanho formados por grânulos de atomizados grudados, conhecidos como “cachos de uva” por sua forma.

2.1.2 CONFORMAÇÃO DA PEÇA

A moldagem das peças, devido a sua forma simples (retangular, quadrada, etc.), e a pequena relação espessura/superfície (geralmente < 0.03), é realizada por prensagem unidirecional a seco (umidade de prensagem < 0.08 kg de água / kg de sólido seco), em prensas hidráulicas de simples efeito. Neste tipo de prensas a pressão é aplicada em apenas uma das superfícies da peça, e em função disto elas só podem ser empregadas para a moldagem de peças com geometria simples e com uma relação espessura/superfície reduzida. A simplicidade deste processo facilita a sua automatização e permite alcançar altos valores de desempenho, se comparados com outros tipos de prensagem (isostático, duplo efeito, etc.) e moldagem (extrusão, colado, etc.).

A potência das prensas utilizadas depende basicamente do tamanho das peças que se deseja obter. Para formatos superiores aos 40.000 mm² (200x200 mm), que são os mais comumente fabricados, se utilizam preferencialmente prensas de 500 a 800 toneladas, com as quais podem ser obtidas de 3 a 4 peças por prensagem.

2.1.3 SECAGEM

As peças recém prensadas passam por um secador contínuo para reduzir a umidade de prensagem para valores na faixa de 0.01 ~ 0.005 kg de água / kg de sólido seco. Incrementando desta forma a resistência mecânica da peça em um valor 2 ou 3 vezes superior ao que esta possuía ao ser recém prensada, o que facilita um posterior processamento ou manipulação.

A reduzida contração que estas peças experimentam durante a secagem (quando comparado com qualquer outro procedimento que necessite de um maior conteúdo de água), a forma destas peças (laminas delgadas) e sua disposição nos secadores (o ar circula ao redor das peças) tomam possível que esta operação se desenvolva com suficiente rapidez.

A duração da secagem depende da temperatura, da umidade e do fluxo de ar

utilizado, das características da peça prensada (dimensões, umidade, compactabilidade, etc.) e da composição e distribuição granulométrica das partículas do pó de prensagem. A duração da secagem, normalmente não é superior a 120 minutos.

2.1.4 ESMALTAÇÃO

As peças recém saídas do secador a uma temperatura superior a 70oC recebem um recobrimento de uma ou mais capas de esmalte cru na linha de esmaltação.

A operação se realiza pela aplicação sucessiva, nos distintos elementos da esmaltadora (pistolas de pulverização, campanas, etc.), das suspensões de esmalte adequadas. Em, determinadas ocasiões, as peças são decoradas automaticamente por procedimentos serigráficos.

Para que a operação de esmaltado ocorra adequadamente e as superfícies esmaltadas uma vez sinterizadas apresentem o aspecto (textura, uniformidade de cor) que se necessita, é essencial manter as propriedades reológicas das suspensões dentro de níveis ótimos.

As peças uma vez esmaltadas são distribuídas adequadamente em vagonetas de espera, para serem introduzidas no forno.

2.1.5 QUEIMA

Durante esta etapa são produzidas as transformações físico-químicas mais importantes que conduzem a microestrutura definitiva da peça sinterizadas e que definem por tanto as propriedades do produto final.

A monoqueima rápida das peças esmaltadas é realizada atualmente em fornos de monoestrado de rodízios sem suporte refratário. Nestes fornos, o material é sinterizado em uma só passagem e é transportado apoiando-se diretamente sobre os rodízios (metálicos ou refratários), que são acionados convenientemente. Como conseqüência disto, o ciclo de queima obtido neste tipo de forno (ciclo com menos de 45 minutos) é muito menor do que o requerido quando as peças são apoiadas sobre uma placa refratária (fornos de rodízios com suporte refratário, ciclos de 2 ~ 2.30 horas) ou quando são colocados, em várias camadas, em compartimentos de refratários (fornos túnel, ciclo de aproximadamente 24 horas)

A monoqueima em ciclos muito curtos, além de desenvolver-se extremamente bem em fornos de monoestrado com rodízios, estes apresentam outras vantagens, como um menor consumo energético, uma maior uniformidade e flexibilidade na queima entre outros, o que contribui em muito para a utilização deste tipo de forno.

As curvas de queima, que são utilizadas na fabricação de pavimentos cerâmicos por monoqueima, variam de uma fábrica para outra em função das composições do suporte e do esmalte, do desenvolvimento das etapas anteriores a queima e das características do produto acabado que se deseja obter (absorção de água, resistência mecânica, etc.). Qualitativamente, a forma da curva é em todos os casos similar a representada na figura 5.

Para determinar o perfil de temperaturas e o ciclo de queima ótimos, para cada caso, são considerados por um lado as tensões térmicas a que estão submetidas as peças nos diversos estágios da queima, e por outro lado o conjunto de transformações químicas e estruturais que se desenvolvem ao longo da operação.

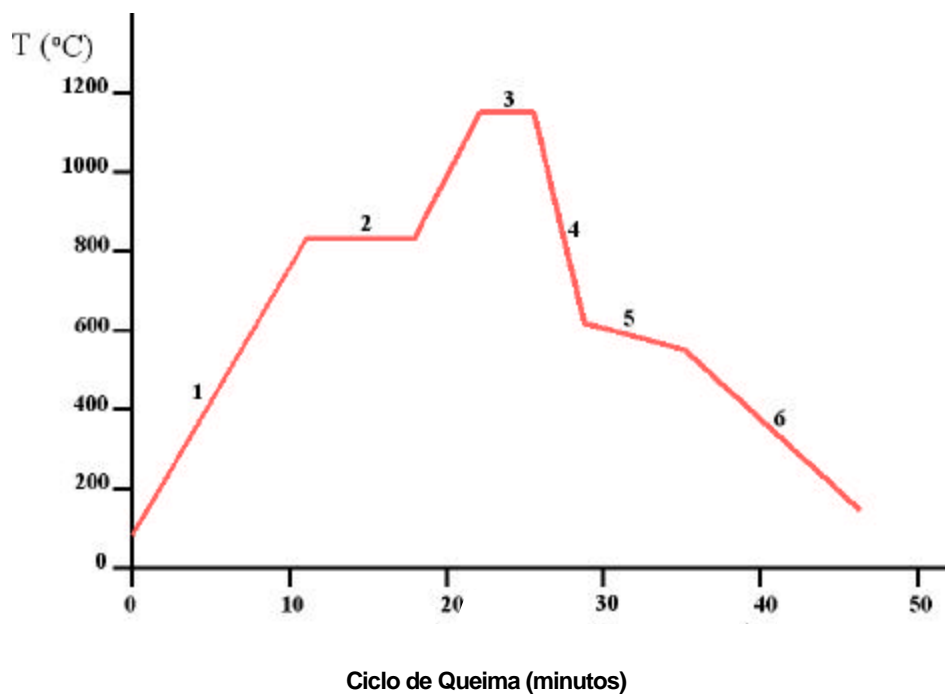


Figura 5 - Ciclo de monoqueima

A etapa inicial de aquecimento, (trecho 1 da figura 5) possui uma taxa de aquecimento que varia entre 60 e 80 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Este valor de taxa de aquecimento é limitado pela eliminação do excesso de umidade residual, que quando é muito elevada pode provocar explosões de peças, ocasionadas pela eliminação violenta deste excesso na forma de vapor. A absorção de

umidade do ambiente durante o armazenamento, a água oriunda do processo de esmaltação e a umidade ambiente na saída do secador são os fatores que em conjunto determinam a umidade que a peça terá na entrada do forno. Esta umidade pode ser reduzida, reduzido assim os seus efeitos, através de uma secagem das peças esmaltadas imediatamente antes da queima, em um secador do tipo túnel convenientemente instalado.

A oxidação dos compostos de carbono e das formas reduzidas dos óxidos de ferro, principalmente, assim como a decomposição de impurezas, que podem estar presentes nas matérias primas, são reações químicas que possuem grande importância na monoqueima rápida.

É de extrema importância que estas reações se completem em um estado não muito avançado da queima, para evitar o surgimento de defeitos no produto acabado. Isto influi inevitavelmente sobre a taxa de aquecimento das peças durante a queima.

Em monoqueima, a decomposição de impurezas com desprendimento de gases deve estar completa antes que o esmalte impermeabilize a superfície em que foi aplicado, do contrário a superfície esmaltada do produto acabado será deteriorada pela presença de "pinchados", provocados por desprendimento dos produtos gasosos nas ditas reações. Por outro lado, uma oxidação incompleta das matérias carbonosas e/ou compostos inorgânicos, inicialmente no estado reduzido, ocasiona nos produtos acabados alterações de cor e textura no seu interior (coração negro) e em certas ocasiões "pinchados" na superfície do esmalte, por desprendimento de óxidos de carbono e/ou enxofre. Nos casos mais exagerados, estas alterações podem chegar a gerar inchamentos e outras deformações nas peças.

Para evitar o surgimento destes defeitos nos produtos acabados, é imprescindível, em monoqueima rápida, dispor de um período de oxidação (trecho 2 da figura 5) a uma temperatura apropriada, e o suficientemente largo para que as reações de oxidação se completem antes de que a permeabilidade do esmalte e do suporte sejam muito baixas, impedindo a difusão dos gases (O_2 , CO_2 , etc.) pelo interior da peça. Este período de oxidação se desenvolve a temperaturas ligeiramente inferiores as de "reblandecimento" do esmalte. Estas temperaturas, estão geralmente compreendidas entre $750^{\circ}C$ e $900^{\circ}C$, dependendo da composição do esmalte.

A oxidação da matéria orgânica e dos óxidos reduzidos deve ocorrer a uma temperatura suficientemente alta para que a velocidade de reação seja a mais elevada possível, favorecendo a etapa de difusão. Sendo de vital importância que não ocorra a impermeabilização desta superfície pela vitrificação do esmalte que a recobre. Mantendo assim o suprimento de oxigênio necessário para que se realizem todas as reações de oxidação, e da

mesma forma permita a saída do CO_2 formado pela oxidação do carbono. No emprego de esmaltes muito fundentes, dificulta-se o processo de vitrificação realizando um aquecimento das peças preferencialmente por sua face não esmaltada.

A duração do período de oxidação, depende fundamentalmente dos seguintes fatores: natureza e quantidade das superfícies oxidáveis; tamanho de partícula destas substâncias; temperatura da etapa de oxidação; atmosfera do forno (concentração de O_2 nos gases da zona onde ocorre se desenvolve este período de oxidação); e a difusividade dos gases da peça cerâmica, que dependem das variáveis de processo anteriores a queima, que afetam a sua textura porosa e a sua composição.

A etapa de queima propriamente dita ocorre em 2 ou 3 minutos (trecho 3 da figura 5) a uma temperatura que varia normalmente entre 1100 e 1200°C. Esta temperatura é uma função das características do produto acabado, das variáveis de processo anteriores a queima e da composição do vidrado e do suporte de uma peça cerâmica. Em monoqueima é desejável que a temperatura de maturação do esmalte coincida com a temperatura em que o suporte alcance as características requeridas (contração linear, absorção de água, etc.). Mas com relativa frequência alguns esmaltes não cumprem esta condição, o que força uma alteração da temperatura de queima. Esta exigência, somadas as possíveis variações da temperatura de queima, que ocasionalmente podem ocorrer, obriga a uma utilização de composições do suporte adequadas para que suas características não sejam excessivamente afetadas, dentro de certos limites, pelas variações da temperatura de queima.

O resfriamento das peças é realizado em três etapas: resfriamento forçado a alta temperatura (trecho 4 da figura 5), resfriamento natural (trecho 5 da figura 5) e resfriamento forçado a baixa temperatura (trecho 6 da figura 5).

A elevada resistência ao choque térmico das peças a elevadas temperaturas, permitem que estas possam ser resfriadas rapidamente sem que ocorra rupturas, apesar do elevado gradiente térmico estabelecido em seu interior (trecho 4 da figura 5). O resfriamento das peças nesta etapa se realiza por convecção forçada com ar injetado a uma temperatura próxima da ambiente. Quando a temperatura da peça esta próxima dos 573°C, onde ocorre a transformação do “quartzo α ” em “quartzo β ”, que ocasiona uma baixa resistência ao choque térmico, obriga a uma redução considerável da velocidade de resfriamento (trecho 5 da figura 5). Neste intervalo de temperaturas, o resfriamento das peças ocorre quase que exclusivamente por radiação e convecção natural. Superado este ponto crítico, o material volta a ser resistente ao choque térmico, o que possibilita o retorno da convecção forçada no resfriamento final da peça (trecho 6 da figura 5).

2.1.6 OS DEFEITOS NO PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo inicia com a avaliação de uma jazida de minério para emprego em uma determinada formulação mássica. Após sua aceitação e iniciada a extração, é realizada uma prévia homogeneização do lote e o transporte deste para a unidade fabril. No recebimento efetua-se um controle de qualidade (laboratório). Seguindo os padrões de qualidade, o minério deve ser estocado de forma a obter um grande lote considerado praticamente homogêneo (laboratório). Quando da liberação para utilização, este é pesado para que se obtenha o valor correto de sua dosagem na massa. A próxima etapa são os britadores, que tem como função reduzir os grandes blocos formados em um tamanho que possa ser facilmente transportado para os moinhos de bolas. Esta etapa tem por função cominuir (moagem) e homogeneizar os diferentes constituintes da massa cerâmica, que neste ponto passa a ser denominada de barbotina. Seguindo então para a “vasca”, que é um reservatório onde é controlado a quantidade de sólidos (laboratório), tendo como função manter a barbotina em movimento evitando que sedimente. O próximo passo é a secagem por atomização. A partir deste ponto o produto é denominado de pó atomizado. Nesta etapa são controlados por laboratório, a umidade e a distribuição granulométrica. Seguindo então o pó atomizado para os silos de estocagem, onde estes deverão permanecer para homogeneizar a sua umidade que permitirá uma prensagem eficiente.

Como ficou demonstrado, até a formação do pó atomizado, muito pouco, até o presente momento, pode ser realizado fora dos laboratórios com o objetivo de controlar o processo de forma a obter um produto com características praticamente uniformes. Deve ser ressaltado neste ponto, que a utilização de “moinhos de bolas contínuos” são um fator de grande valia para o controle e qualidade do produto e a automação do processo.

Os atomizadores na atualidade, são um dos pontos onde podem ser exercidos controles efetivos sobre o processo de produção, prevenindo o surgimento de defeitos ou imperfeições futuras no produto cerâmico. Para demonstrar o efeito destes no produto, a seguir é feito um breve relato dos defeitos mais comuns, suas causas e como podem ser evitados. Denotando a importância deste trabalho para obtenção de um produto mais uniforme (Tará, 1991).

Um dos defeitos detectados em produtos atomizados é a presença de grãos de elevada densidade na massa. Densidade esta, que é uma função do volume de poros intergranulares (poros exteriores aos grânulos que se formam no empacotamento de pó ao encher o molde) e da densidade do grânulo. Esta última depende, por sua vez, do processo de preparação da massa, das variáveis de processo (densidade da barbotina, moagem, umidade

de atomização, etc.) e da forma e distribuição das partículas que compõem o aglomerado. A menor densidade dos grânulos de atomizado e a diminuição desta ao aumentar o tamanho se deve, fundamentalmente, a existência de crateras e poros internos, que crescem em volume com o tamanho do grânulo.

Além do empacotamento das partículas no grânulo de atomizado ser mais poroso, o que também contribui a reduzir a densidade dos grânulos de atomizado. O outro fator de que depende a densidade aparente do pó é o volume de poros intergranulares. A porosidade intergranular depende da forma e distribuição do tamanho dos aglomerados ou grânulos, e está marcadamente afetada pela fluidez do pó. Um elevado atrito entre as partículas conduz a uma baixa densidade aparente, ainda que os restantes fatores sejam adequados para alcançar um empacotamento mais compacto.

No atomizado, a reduzida densidade do grânulo e sua estreita distribuição de tamanhos fazem que a densidade aparente seja mais baixa.

Os grânulos de densidade elevada são gerados, normalmente, a partir de uma gota de água que no equipamento de umidificação ou granulação que vai sendo rodeada por pó seco, formando um grânulo de núcleo úmido. O grânulo assim constituído é pouco permeável e permanece como tal até o processo de prensagem.

Estes grânulos de elevada densidade produzem na superfície das peças, no momento da prensagem da massa, pontos de compactação muito maior (idêntica pressão mas umidade muito maior) (Albaro, 1983), que se transformam, depois da queima, em zonas de baixa sucção (Beltrán Porcar, 1988). Tal defeito foi amplamente estudado por diversos autores (Beltrán Porcar, 1991), e consiste de uma fenda pontual do esmalte, ou de um aprofundamento da superfície esmaltada depois da sua aplicação ou, em certas ocasiões, pode ser produzido por um “coração negro” pontual. Os grupos ou aglomerados de elevada densidade aparente são gerados na etapa de secagem por atomização nas massas trituradas por via úmida. Para facilitar a compreensão deste defeito, foi produzido um diagrama de “causa - efeito” (figura 6).

Outro ponto de grande importância para o processo de fabricação de pavimentos e revestimentos é a crescente exigência por peças com geometria constante, que são obtidas pelo emprego de massas granuladas, de maior fluidez e homogeneidade (processo de secagem por atomização), e pela melhora dos moldes e prensas utilizadas.

Desta forma, a massa proveniente do processo de atomização é empregada, após ter sido estocada em silos para homogeneizar a umidade, nas prensas isostáticas para conformar o produto denominado de “prensado verde”. Ou seja, é gerada a base onde serão depositados

os complementos que forneceram o aspecto final do produto após sua queima. Este método é denominado de prensagem a seco, e é o método de formação da peça mais utilizado na fabricação de pavimentos e revestimentos cerâmicos. Para a conformação das peças é utilizado o pó atomizado com uma umidade compreendida entre 4.5 e 8% (Monzó Fuster, 1987 e 1988).

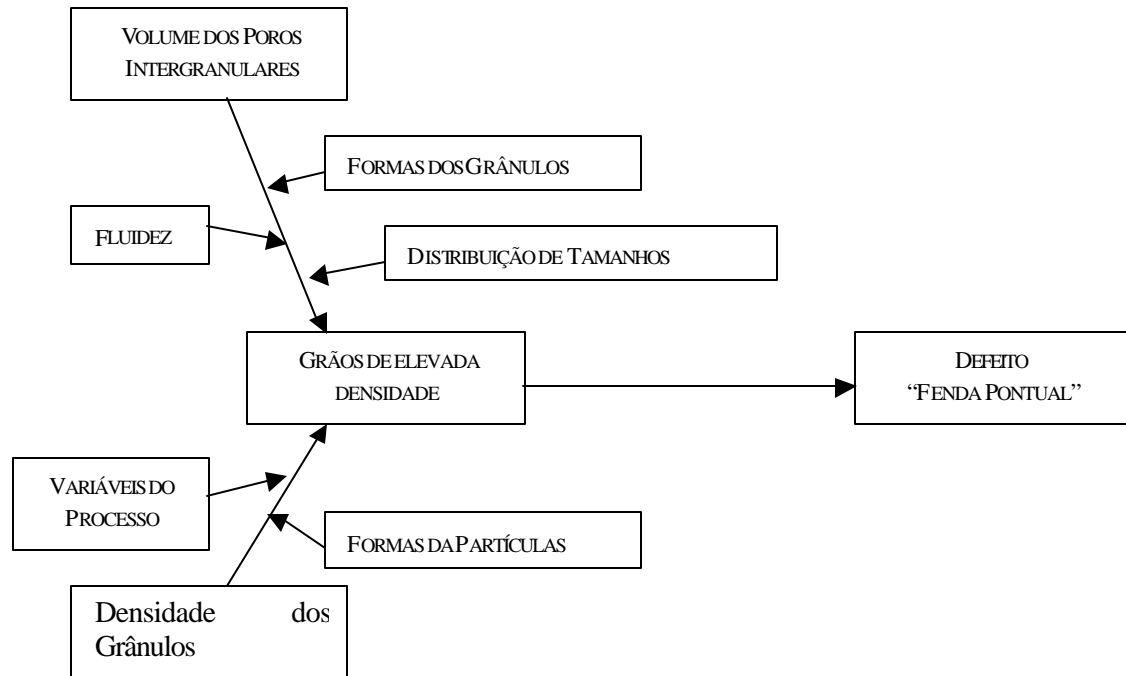


Figura 6 – Diagrama de “causa – efeito” para o defeito denominado de “fenda pontual”.

As propriedades da peça sinterizada (contração linear, absorção de água, etc.) e o desenvolvimento das etapas posteriores a prensagem (secagem, esmaltação e queima) são muito influenciadas pelas características da peça à seco (densidade aparente, resistência mecânica, etc.). Os defeitos que mais comumente estão relacionados a esta etapa, e que como fonte geradora a etapa de secagem por atomização estando intimamente relacionados com a densidade aparente média à cru da peça (coração negro, deformação pirolástica, etc.), são as possíveis flutuações desta propriedade entre as peças (falta de estabilidade dimensional, etc.) ou com a falta de uniformidade da compactação pontual nas diferentes zonas da peça no estado cru (fora de esquadro, etc.) (Amorós Albaro, 1984).

O desenvolvimento mais eficaz da operação de prensagem, para obter uma maior uniformidade nas e entre as peças e uma produção mais elevada, é obtida quando do preparo

do pó para prensagem pela cominuição via úmida, eliminando o excesso de água presente pela secagem por atomização. Esta é a causa determinante de que este procedimento (de maior custo e de maior consumo energético que a “via seca”) seja utilizado quase exclusivamente para a fabricação de pavimentos e revestimentos cerâmicos (Blasco Fuentes, Técnica Cerámica 116 e 117, 1983).

Para o desenvolvimento da operação de prensagem é essencial obter uma distribuição uniforme da massa no molde durante a carga, assim como a aplicação de uma pressão suficientemente alta e uniforme para compactar as peças. De modo geral é possível afirmar que quanto menor é a umidade, maior deve ser a pressão para obter uma compactação uniforme (Amorós Albaro, Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr. 1982 e 1983, Técnica Cerámica 1983).

Entre os defeitos mais freqüentes (Bagán, 1991) que apresentam as peças de pavimentos e revestimentos produzidos por uma deficiente operação de prensagem podem ser destacados os seguintes: falta de prensabilidade, fora de esquadros, curvaturas, gretas, acunhado, espessura diferente, pegados ao molde e reprensados, rebarbas, repegados, áreas sobreprensadas, furos, etc.

A falta de prensabilidade é um defeito que está ligado a presença de ar no pó, introduzido na matriz e a impossibilidade de sua completa eliminação. Este acontecimento provoca a laminação (desfolhado) da peça (com capas de material compactado alternadas com capas de ar aprisionado). As causas deste defeito são múltiplas e inclusive podem apresentar-se simultaneamente. Entre elas podem ser citadas as seguintes: formulação inadequada, cominuição extremamente rápida, excessiva proporção de partículas finas, deficiente umidificação do pó, tempo de homogeneização reduzido, funcionamento da prensa não adaptado as características do pó e moldes inadequados. A forma e distribuição granulométrica das partículas, a umidade e sua homogeneização, as condições da prensa e a operação de prensagem são as variáveis que influem de uma forma mais decisiva sobre o surgimento deste defeito, que em sua essência aparecem pela dificuldade de eliminação do ar ocluso na operação de prensagem. A experiência demonstra que o desfolhado pode ser produzido quando a umidade da massa está demasiado alta ou demasiado baixa (Amorós Albaro, 1991). Dependendo da composição, existe uma quantidade de umidade ideal para que a probabilidade de que se produza o defeito seja mínima. Esta quantidade só pode ser determinada experimentalmente, por ensaios de compactação, variando a umidade e a pressão de prensagem. Um tempo de repouso reduzido do pó umidificado, nos silos, causará problemas de diferenças de umidade entre distintas proporções do pó, o que provocará com facilidade o fenômeno de desfolhado. E de forma que facilite a compreensão deste defeito, foi

criado um diagrama de “causa - efeito” (figura 7).

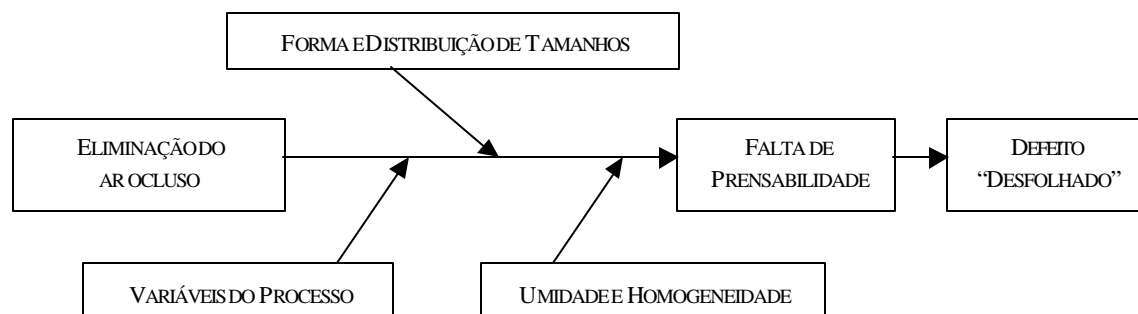


Figura 7 – Diagrama de “causa – efeito” para o defeito denominado de “Desfolhado”.

O fora de esquadro é um defeito que se manifesta como uma diferença de dimensões entre os lados da peça, no comprimento e na largura dos mesmos, assim como uma variação nos ângulos, que não são de 90° (Kingery, 1957). Este defeito ocorre por uma distribuição irregular da densidade aparente na peça, que motiva por sua vez uma diferença de contração linear entre as distintas zonas da peça, sendo muito mais acentuada em produtos de pavimento que apresentam uma contração na queima superior a 5%. A distribuição de densidade aparente deverá ser por tanto a mais perfeita, quanto maior for a contração de queima da peça, para que este defeito seja evitado. Esta compactação irregular pode ser originada por uma inadequada carga do molde durante a prensagem. A fluidez dos grânulos da massa têm uma grande importância neste aspecto, o que denota a importância das variáveis de processo que influenciam sobre esta propriedade. A operação de prensagem, assim como a microestrutura das peças prensadas, estão marcadamente afetadas pelas propriedades das partículas (natureza, tamanho, distribuição, forma, etc.), pelas características dos aglomerados das partículas (forma, distribuição de tamanhos, densidade e dureza) e pelos aditivos de prensagem (umidade, ligantes, plastificantes, etc.) (Amorós Albaro, 1986). As características anteriormente mencionadas, que são função por um lado da composição e por outro da preparação da massa (atomização, via seca tradicional e granulação) determinam por sua vez outras propriedades como: densidade aparente, fluidez, compactabilidade, etc. (Sing, 1976). E de forma que facilite a compreensão deste defeito, foi criado um diagrama de “causa - efeito” (figura 8).

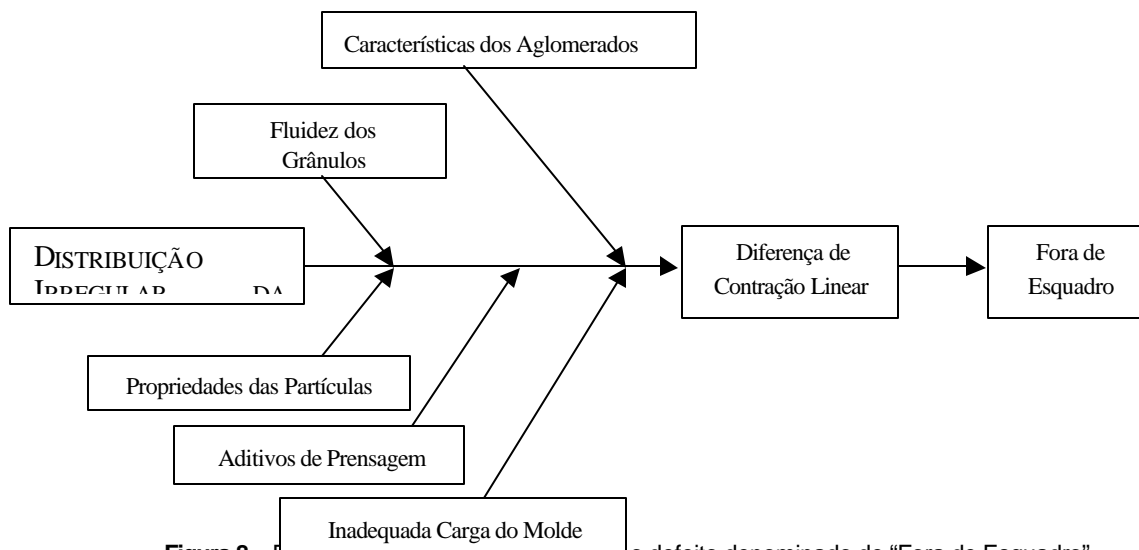


Figura 8 – Diagrama de causa-efeito para o defeito denominado de “Fora de Esquadro”.

O preenchimento uniforme e constante do molde é uma das etapas mais críticas da prensagem. Para isto o pó deve apresentar boas propriedades reológicas, já que uma boa fluidez do pó permite que o preenchimento do molde se realize à velocidades elevadas sem prejuízo da uniformidade da peça prensada.

O surgimento de fendas em uma peça de monoqueima pode estar relacionado a diversos fatores. As mais freqüentes são as fendas abertas nas bordas, que podem ter as seguintes causas: compactação insuficiente, massa excessivamente plástica e extração deficiente da peça prensada. A resistência mecânica do “prensado verde” é uma das propriedades mais importantes das peças moldadas, já que é imprescindível que estas suportem sem deteriorar os esforços térmicos e/ou mecânicos que sofrem durante as etapas anteriores a queima. Na extração das peças cerâmicas dos alvéolos do molde, ao ser interrompida a força da prensa, é produzida uma reação elástica da peça. A expansão elástica da peça depende fundamentalmente, além do desenvolvimento das etapas anteriores de prensagem, da forma de preparar o material de partida que alimenta prensa, assim como de sua umidade e da composição (Reed, 1976). E, a força necessária para extrair a peça do molde depende, além das dimensões da peça e da quantidade e natureza do lubrificante. Durante a extração da peça, o atrito desta com as paredes do molde pode originar fendas, rupturas ou deformações se sua resistência mecânica não é suficientemente elevada para suportar o

esforço mecânico. E para facilitar a compreensão deste defeito, foi criado um diagrama de “causa – efeito” (figura 9).

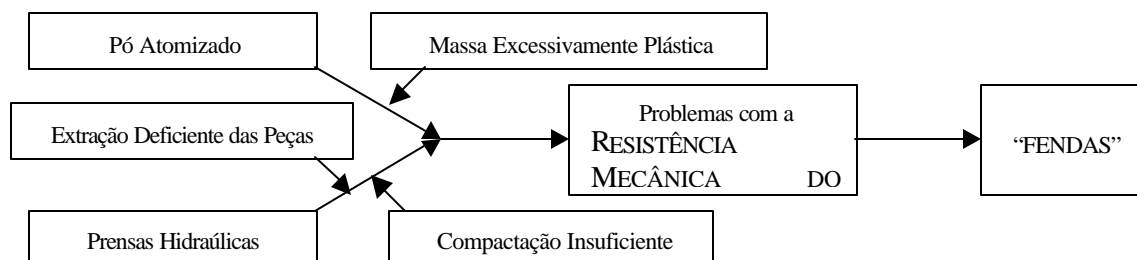


Figura 9 – Diagrama de “causa – efeito” para o defeito denominado de “Fendas”.

A origem dos defeitos denominados de “pegados ao molde” e “reprensados” está na adesão de partículas da massa a uma das placas do molde. O problema aparece quando afeta a superfície lisa da peça, uma vez que ao ser produzido na parte inferior não afeta a superfície à esmaltar. Assim como, uma excessiva tendência a sujar os moldes pode causar a redução da capacidade de produção da prensa. Este defeito é mais comum quando da utilização de moldes de aço, enquanto que com moldes revestidos de borracha aparece com menor frequência. Em geral, favorecem o surgimento do defeito as massas pouco plásticas e com umidades altas, assim como o uso de pó atomizado e prensas hidráulicas, com relação a moagem em seco e a utilização de prensas de fricção. No caso do atomizado, este comportamento pode ser uma função da estrutura esférica das partículas e sua tendência a possuir uma maior umidade no interior do que no exterior. As prensas hidráulicas acentuam o problema uma vez que seu funcionamento obriga a um maior tempo de permanência dos punções em contato com o pó, em relação as prensas de fricção. E para facilitar a compreensão deste defeito, foi criado um diagrama de “causa – efeito” (figura 10).

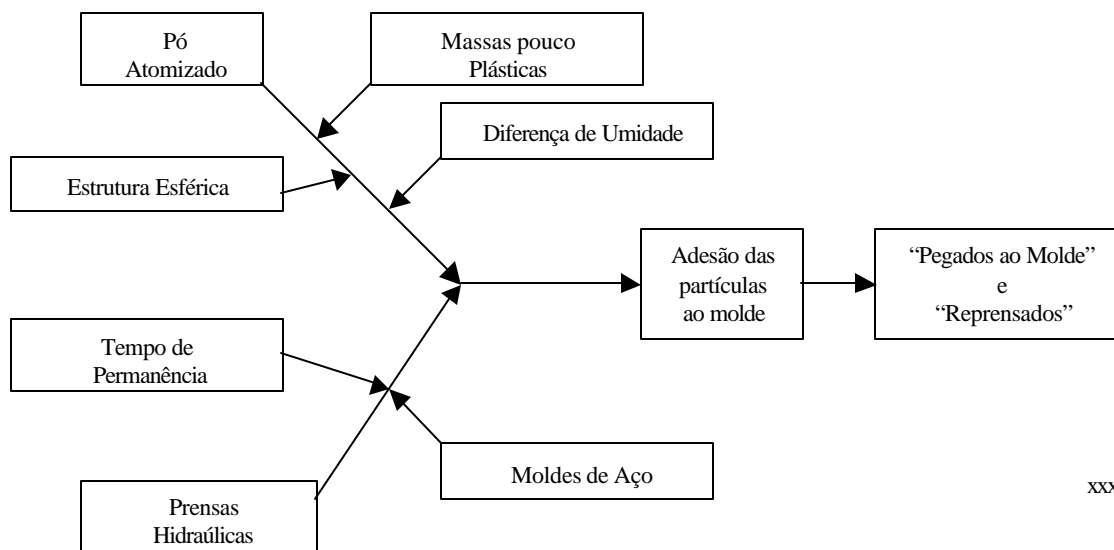


Figura 10 – Diagrama de “causa-efeito” para o defeito denominado de “Pegados ao Molde” e “Reprensados”.

As pontas gastas ou moles são defeitos têm origem em uma massa excessivamente desengraxada, podendo ser acentuado ainda quando a prensagem é realizada com baixa umidade ou pressão (Monzó Fuster, 1987 e 1988). A solução consiste em aumentar a plasticidade, a pressão ou a umidade do prensado.

O defeito denominado de “quadro periférico” é originado por uma porção excessiva de partículas finas que durante a prensagem seguem o movimento do ar e se concentram na borda das peças. Nos produtos de monoqueima, este fenômeno pode reduzir a adesão do engobe nas bordas, aumentando a tendência de separação no caso de golpes. Para evitar no possível a incidência do defeito convêm aumentar a umidade de prensagem e reduzir a velocidade de queda do punção.

Os buracos (Padoa, 1979), são defeitos que consistem de uma pequena depressão, de alguns décimos de milímetro, na superfície plana das peças. Podendo ser originado pela presença no pó que alimenta as prensas de grânulos de massa no estado plástico, formados durante o processo de umidificação, e que produzem uma porosidade pontual inferior e, por conseguinte, uma menor absorção. Estes grânulos produzem uma porosidade pontual do suporte sensivelmente inferior, que se traduz em uma menor absorção, o que provoca umas diferenças pontuais de espessura da camada de esmalte. O punção sujo também pode provocar pequenas depressões na superfície da peça.

Aceitando, pois, a tese de Enrique Navarro (1987) de que a base do moderno controle de fabricação é a prevenção, foram analisadas a relação existente entre os diferentes defeitos de fabricação que podem ser produzidos e as etapas do processo onde são gerados, assim como as causas. Denotando pelo que foi exposto, a importância de realizar um controle de processo efetivo sobre a operação de secagem por atomização.

2.2 O PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO

O processo de atomização, que na indústria cerâmica, representa a fase final no ciclo de preparação da massa. Têm por objetivo, eliminar uma quantidade pré-determinada do conteúdo de água presente na barbotina e obter um produto com granulometria e umidade

residual adequadas para as etapas posteriores do processo de fabricação.

2.2.1 ETAPAS DO PROCESSO

A secagem por atomização apresenta quatro etapas distintas: a) atomização do material no pulverizador; b) contato ar-pulverizado; c) secagem do pulverizado; d) separação do material atomizado do ar. Cada etapa é realizada segundo o projeto e o modo de operação do secador (atomizador), que em conjunto com as propriedades físicas e químicas do material, determinam as características do produto seco. A homogeneidade do produto pulverizado e as altas velocidades de evaporação de umidade permitem uma temperatura do produto menor do que a do ar que sai da câmara de secagem. Deste modo, o produto não é submetido a altas temperaturas e uma vez separado do ar de secagem, deixa de apresentar degradação térmica. O princípio básico que fala: "evaporação produz resfriamento", é muito adequado nesta operação.

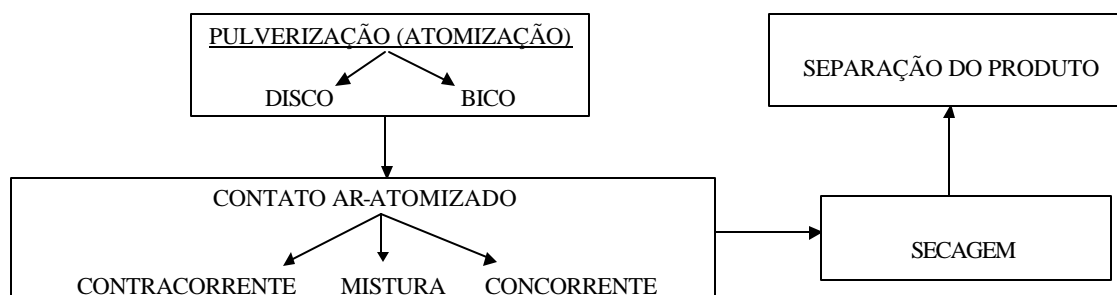


Figura 11 - Etapas da secagem por atomização.

Na figura 11 é demonstrada a seqüência das etapas do processo e na figura 12 está esquematizado um equipamento de atomização atual.

2.2.1.1 ATOMIZAÇÃO DO PRODUTO

A formação do produto atomizado e o contato ar-atomizado são as etapas características da secagem por atomização. A seleção e operação do atomizador é de grande importância quando o objetivo é alcançar um custo mínimo de produtos atomizados com qualidade.

A etapa de atomização deve criar um pulverizado com condições ótimas de evaporação, que permita alcançar um produto seco e com as características requeridas.

Para a pulverização são utilizados atomizadores giratórios (discos) ou de bicos de pressão.

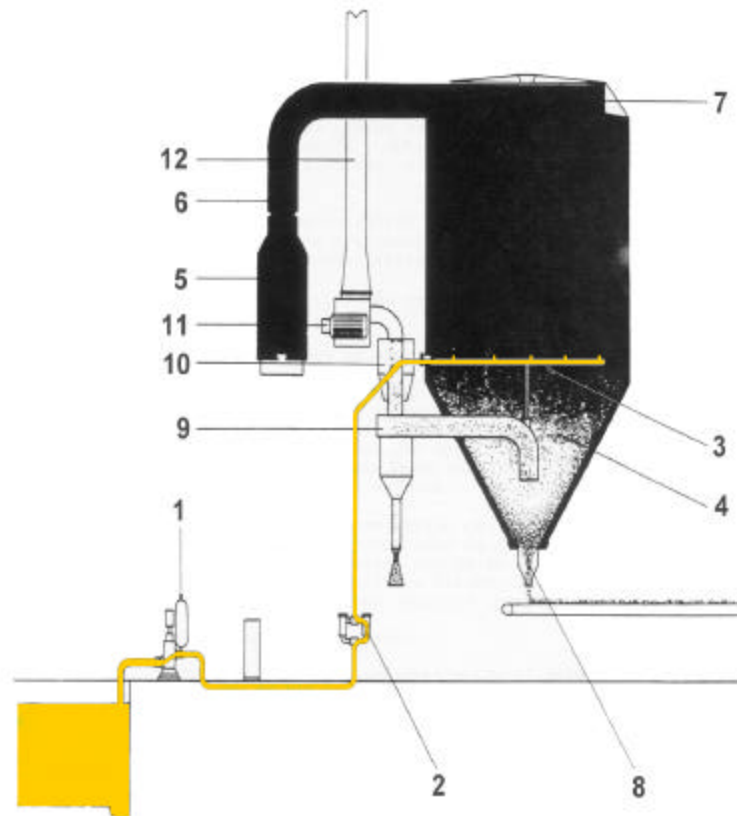


Figura 12 - Esquema de uma instalação de secagem por atomização

Legenda:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1) Bomba de alimentação de barbotina | 7) Distribuidor de ar quente |
| 2) Filtros | 8) Válvula de descarga de pó atomizado |
| 3) Anel de bicos de atomização | 9) Ciclone |
| 4) Torre de secagem | 10) Separador úmido |
| 5) Gerador de ar aquecido | 11) Ventilador |
| 6) Condutores de ar aquecido | 12) Chaminé |

⇒ **Atomizadores rotatórios:**

A alimentação é introduzida pelo centro, sobre um sistema giratório. O fluxo se desloca por ação de uma força centrífuga para a periferia, onde a suspensão se desintegra na

forma de gotas. Um amplo raio de características do atomizado é obtido pela variação da vazão de alimentação, velocidade do sistema e projeto do mesmo. A Figura 13 mostra um exemplo de um atomizador rotatório, com um disco atomizador na forma de um prato invertido.

Os sistemas de atomização, representados na Figura 14, com chicanas podem operar para produzir atomizados de granulometrias finas e médias. E os de disco são utilizados quando é necessário obter granulometrias grossas, com alta capacidade de produção. Os desenhos dos discos podem ser: pratos, taças e recipientes côncavos invertidos.

⇒ **Bicos de pressão:**

Neste sistema de pulverização a alimentação chega ao bico de pressão, a suspensão gira dentro do bico por ação da pressão e sai pelo orifício do bico. A Figura 15 mostra um destes bicos para melhor visualizarmos o seu projeto.

Os atomizadores que utilizam o sistema de bicos, quando trabalham com vazões grandes de alimentação produzem um produto com menor homogeneidade e mais grossos do que os produzidos por atomizadores rotatórios com chicanas. Quando os valores de vazão são baixos, os atomizados obtidos são pelos dois procedimentos são comparáveis. Com a duplicação do número de bicos, é obtido um atomizado mais fino. Ainda que a utilização dos bicos é empregada quando o objetivo são pós atomizados grossos, com tamanho médio entre 120 e 250 μ m.

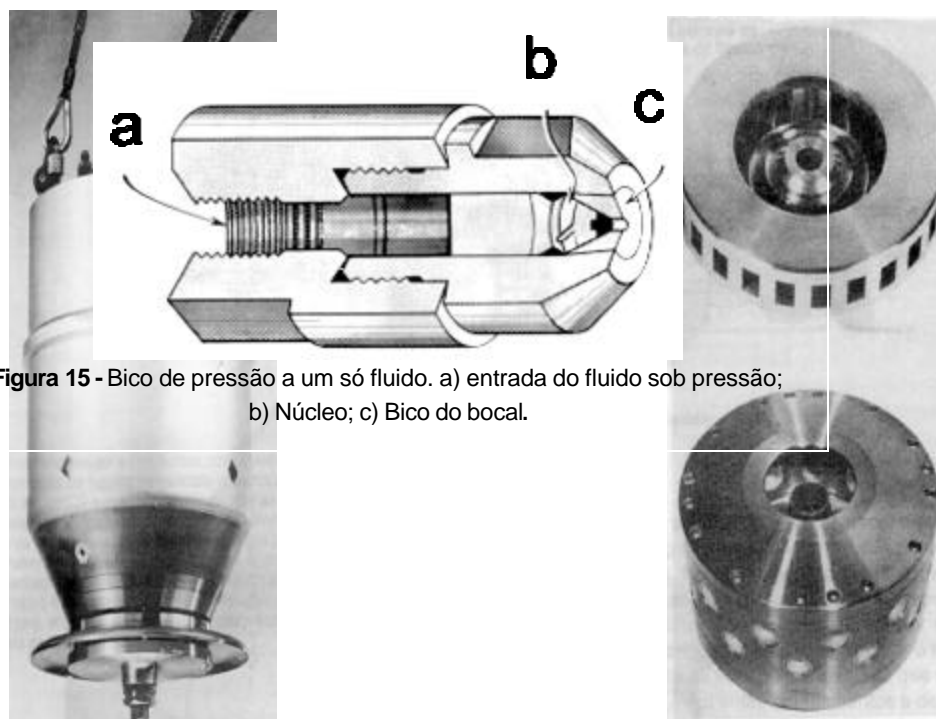


Figura 15 - Bico de pressão a um só fluido. a) entrada do fluido sob pressão; b) Núcleo; c) Bico do bocal.

Figura 13 - Conjunto atomizador a disco centrífugo, com um disco atomizador na forma de um prato invertido.

Figura 14 - Discos atomizadores próprios para diversas aplicações. O superior é uma disco com chicanas retas, e o inferior é um disco de alta capacidade com bicos resistentes a abrasão.

A variação da pressão aplicada na barbotina permite o controle da vazão da mesma e as características do atomizado; o tamanho médio do atomizado é proporcional a vazão e a viscosidade da barbotina e inversamente proporcional a pressão.

2.2.1.2 CONTATO AR - ATOMIZADO

O contato ar-atomizado é determinado pela posição do atomizador em relação a entrada do ar de secagem (Figura 16). A escolha de um destes sistemas é uma função do tamanho médio da partícula de atomizado e da possível degradação térmica do produto. Na Figura 17 estão descritas as distribuições de temperatura do ar em contracorrente, concorrente

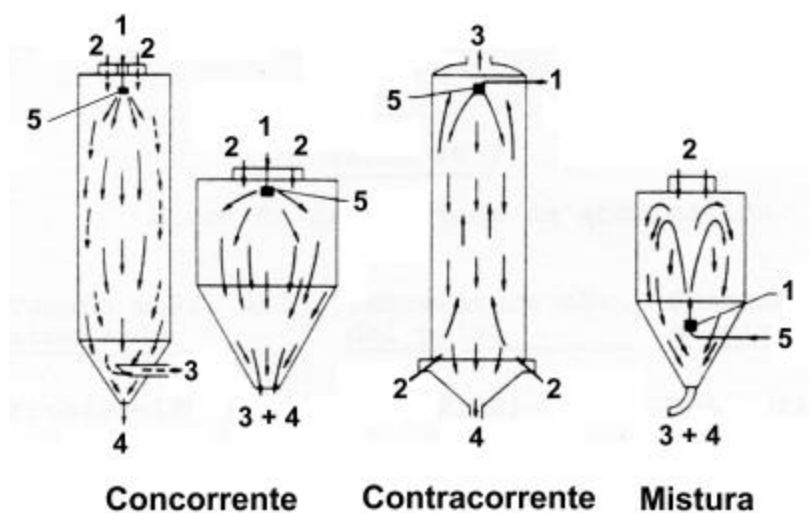


Figura 16 - Contato ar-atomizado: 1 - entrada de ar; 2 - entrada de produto; 3 - saída de ar; 4 - saída de produto e 5 - atomizador

e mistura.

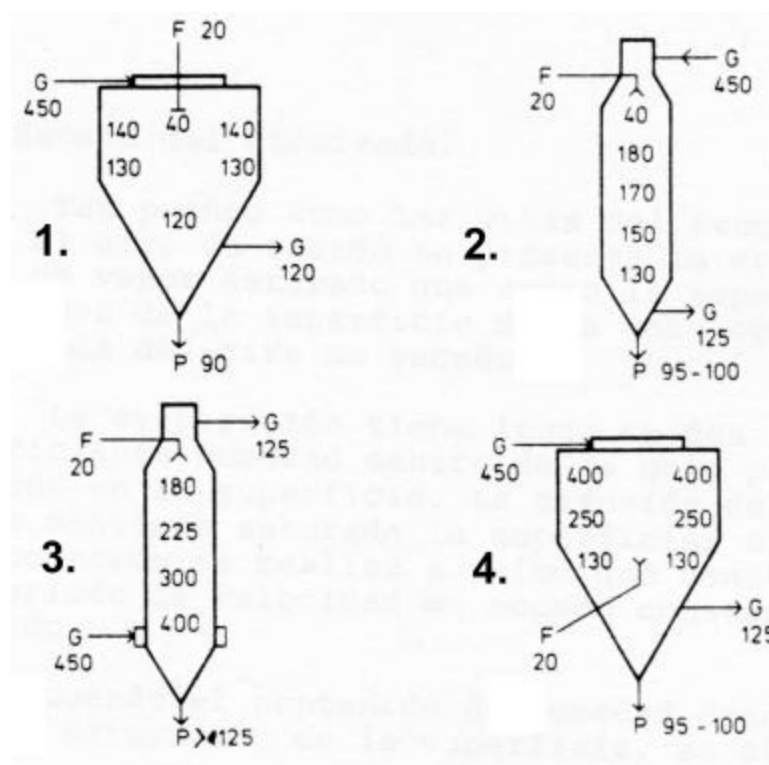


Figura 17 - Distribuição de temperatura em diversos tipos de atomizadores.
1 e 2 Concorrente; 3 Contracorrente e 4 Mistura.

O projeto da câmara e o método de introdução do ar é selecionado de acordo com:

- Tamanho de partícula necessário;
- Forma da partícula seca;
- Temperatura a que pode ser submetida a partícula seca.

Na Tabela 1 está detalhada a forma de eleger o atomizador mais adequado, em função das características requeridas no pó atomizado e da temperatura que esta pode alcançar.

Tamanho médio do atomizado	Temperatura máx. do pó	Sistema de atomização	Tipo de atomizador
Fino (30~120:)	Baixa (25°C)	Rotatório	Contato concorrente
Grosso (120~250:)	Baixa (25°C)	Bico	Contato concorrente
Grosso (120~250:)	Alta	Bico	Mistura

Tabela 1 - Escolha do sistema de atomização

2.2.1.3 SECAGEM DO ATOMIZADO

No momento que as gotas do atomizado entram em contato com o ar secagem, inicia o processo de evaporação. Este começa pela película de vapor saturado que circunda a superfície da gota. A temperatura da superfície da gota se aproxima da temperatura de bulbo úmido do ar de secagem.

A evaporação ocorre em duas fases; na primeira existe suficiente umidade dentro da gota para recolocar a que se perde pela superfície. A difusão da água desde o centro da gota mantém saturada a superfície; enquanto esta fase dura, a evaporação se dá à velocidade constante. E a este, denomina-se período de velocidade de secagem constante ou primeiro período de secagem.

Quando o conteúdo de umidade decresce e não pode manter a saturação na superfície, se alcança o ponto crítico, e a evaporação depende da velocidade de difusão da água no interior da gota. A espessura da zona seca aumenta com o tempo, provocando uma diminuição da velocidade de evaporação. Esta etapa é denominada de período de velocidade de secagem decrescente ou segundo período de secagem.

Deste modo, a parte mais importante da evaporação ocorre quando a superfície das gotas está saturada e fria. O projeto da câmara de secagem e a vazão de ar determinam o tempo de residência das gotas na câmara, de modo a umidade das gotas decresça até o valor desejado e o produto saia do atomizador antes de que sua temperatura alcance a temperatura de saída do ar da câmara. Por isto, o risco de degradação térmica do produto é baixo.

Durante a evaporação, a distribuição do atomizado se altera, já que os diversos produtos exibem diferentes comportamentos durante a evaporação. Alguns tendem a expandir, outros fraturam ou desintegram, gerando formas porosas e outros mantêm uma forma esférica constante ou inclusive contraem, de modo que as partículas aumentam de densidade.

As variações de forma da partículas e das características do pó estão intimamente relacionados com a velocidade de secagem e de que estas considerações devem levar em conta o desenho da câmara de secagem.

2.2.1.4 SEPARAÇÃO DO PRODUTO SECO DO AR

São utilizados dois sistemas de recuperação do produto (Figura 18).

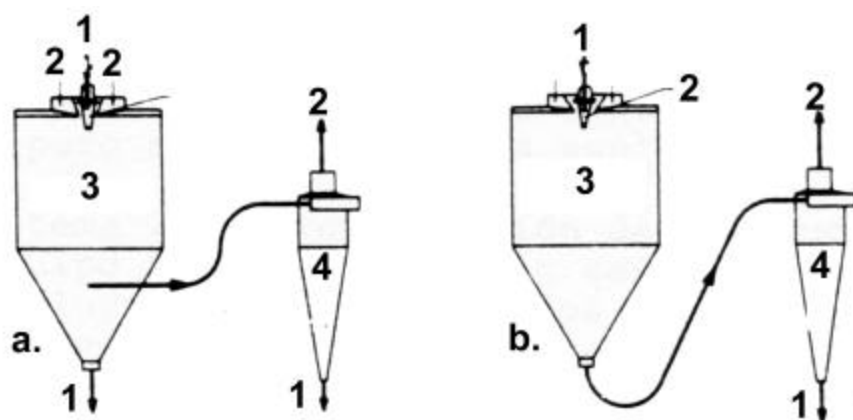


Figura 18 - Sistemas de recuperação de produto. 1 - Produto; 2 - Ar; 3- Câmara; 4- Ciclone

No sistema 1, a separação primária do produto ocorre na base do atomizado (Figura 18a). Durante a operação, a maior parte do produto fica depositado na base da câmara, enquanto que uma pequena fração é arrastada pelo ar e recuperada pelo equipamento de separação. Estes equipamentos são normalmente ciclones que realizam a coleta da parte seca, e os lavadores que realizam a coleta úmida da parte final. Uma alternativa aos ciclones são os filtros de mangas e os precipitadores eletrostáticos (Figura 19).

Com este sistema são separados os grossos, que são recolhidos na câmara de secagem, e os finos, que são recolhidos nos separadores, mas ambas frações são unidas posteriormente.

No sistema 2, a recuperação do produto seco é realizada em um equipamento de separação. A separação do produto seco do ar exerce influência sobre as propriedades posteriores do pó, uma vez que um excessivo manejo mecânico pode produzir pós que tenham porcentagens altas de finos (figura 18b).

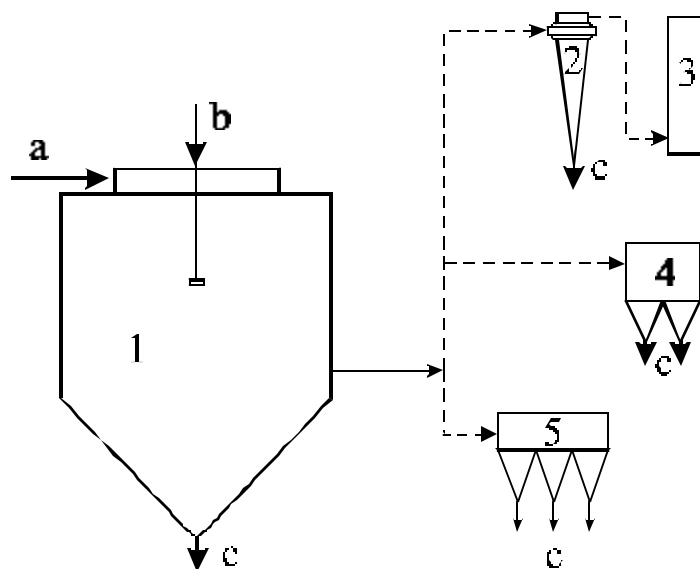


Figura 19 - Esquema de uma planta de atomização

a)	Ar	b)	Alimentação	c)	Produto Seco
1)	Câmara de secagem	2)	Ciclone	3)	Lavador
4)	Filtro de mangas	5)	Precipitador Eletrostático		

2.2.2 EFEITO DAS VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Para atingir as características desejadas do pó atomizado é necessário estudar as quatro etapas do processo, uma vez que:

- a técnica de atomização empregada e as propriedades da barbotina exercem um efeito marcante sobre a distribuição do tamanho de partícula, densidade, aspecto e conteúdo de umidade.
- o contato ar-atomizado e a evaporação resultante do processo de secagem afetam a densidade, aspecto, conteúdo de umidade e a fragilidade dos grânulos.

A seguir são descritos com detalhes a influência das variáveis de operação sobre as características do produto seco.

2.2.2.1 ENERGIA DISPONÍVEL PARA A ATOMIZAÇÃO

O aumento do consumo energético com a vazão de barbotina constante produz grânulos menores. Assim mesmo, o aumento da velocidade nos atomizadores rotatórios, da pressão nos bicos ou da relação ar-barbotina diminuem o tamanho médio das gotas do produto atomizado.

2.2.2.2 PROPRIEDADES DA BARBOTINA

O aumento da viscosidade da barbotina, determinado pelo aumento do conteúdo de sólidos ou pela diminuição da temperatura, produz partículas mais grossas em condições de operação constantes. O aumento do conteúdo de sólidos da barbotina afeta as características de evaporação e geralmente produz um aumento de tamanho e de densidade.

2.2.2.3 VAZÃO DE BARBOTINA

Ao aumentar a vazão de barbotina, operando nas mesmas condições, são produzidas distribuições granulométricas mais grossas.

2.2.2.4 PROJETO DO SISTEMA DE ATOMIZAÇÃO

No caso de atomizadores rotativos, a variação do projeto dos canais por onde circula a barbotina no sistema giratório, determina a quantidade que estará presente na periferia do sistema e por tanto altera as características dos grânulos de atomizado. A variação do projeto dos canais pode ser em número, altura, largura e comprimento. Por outro lado, nos atomizadores de bicos ao se duplicar os mesmos, mantendo a pressão constante, são produzidos grânulos mais finos, uma vez que é reduzida a vazão da suspensão que chega ao bico.

2.2.2.5 VAZÃO DE AR

A vazão de ar controla o tempo de permanência do produto na câmara de secagem. Se o tempo de permanência é aumentado, a retirada da umidade dos grânulos é acentuada.

2.2.2.6 TEMPERATURA DE SECAGEM

Temperatura de entrada: o aumento na temperatura de entrada aumenta a

capacidade de evaporação do atomizador, à velocidade constante. Temperaturas de entrada mais altas aumentam o rendimento térmico da operação de secagem.

Em alguns casos ao aumentar a temperatura de entrada ocorre uma redução da densidade, como consequência do aumento da velocidade de evaporação, e os produtos de saída são mais porosos ou mais fragmentados.

Temperatura de saída: para um conteúdo de umidade fixado e com projeto de atomizador, a temperatura de saída mantêm-se em um intervalo estreito com o objetivo de conservar o empacotamento dos grânulos e as características de fluidez. Um aumento da temperatura de saída diminuí o conteúdo de umidade para uma vazão de ar e de combustível constantes.

2.2.3 REPRESENTAÇÃO DE ATOMIZADOS

Na Figura 20 está representado o intervalo de partículas obtidas nas operações de atomização.

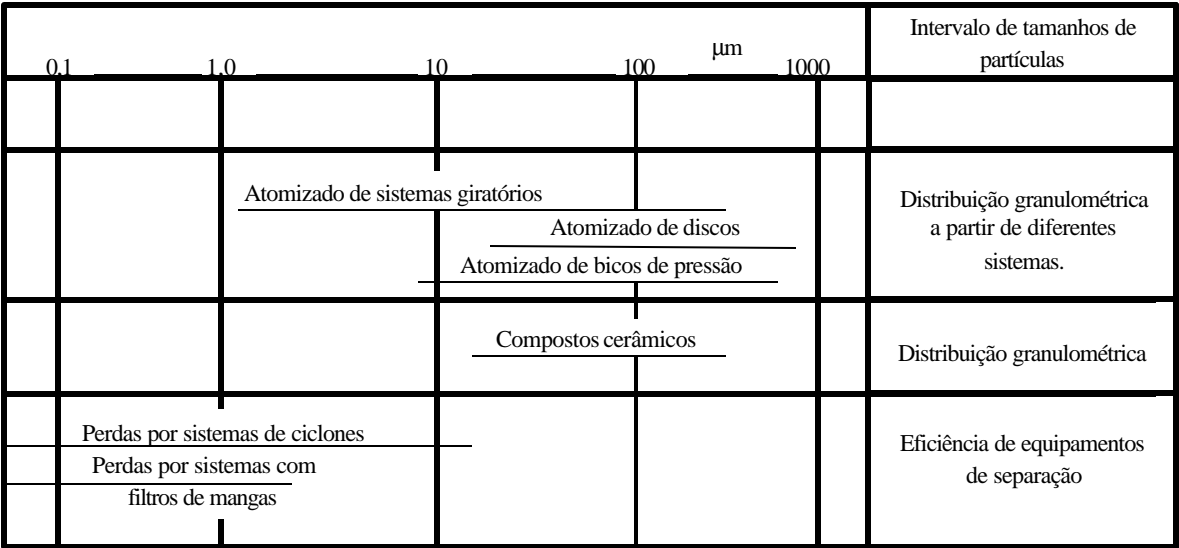


Figura 20- Intervalo granulométrico obtidos em operações de secagem por atomização.

A seguir são expostos de uma forma sucinta a terminologia adotada em sistemas de atomização.

2.2.3.1 TERMINOLOGIA

- **Gotas:** indicam o estado de subdivisão do produto (barbotina) atomizado. Enquanto a superfície do grânulo está úmida, o atomizado é dito composto por gotas.
- **Partículas:** indicam o estado de subdivisão do produto seco. A forma da partícula depende do modo em que se forma a gota e do comportamento desta durante a secagem.
- **Aglomerado:** quando duas ou mais partículas estão aderidas umas nas outras.
- **Tamanho:** de uma partícula, gota ou aglomerado é a dimensão representativa das mesmas. Para partículas esféricas o diâmetro das mesmas representa o seu tamanho, para partículas não esféricas o tamanho pode ser representado por um diâmetro aparente.
- **Forma da partícula:** a complexidade dos mecanismos de atomização e as distorções das gotas durante a secagem provocam em muitos casos que os produtos secos não apresentem partículas esféricas. Para expressar o desvio da esfericidade é utilizado um fator de forma definido como a relação entre a superfície ou o volume verdadeiro e a superfície ou o volume total obtido mediante técnicas de medida de partículas que suponham a esfericidade das partículas (análise microscópica ou peneiramento).
- **Distribuição granulométrica:** os atomizadores não podem produzir partículas homogêneas e ainda as gotas de atomizado estão sujeitas a diversas distorções de forma que dependem das características de secagem e da trajetória das mesmas no atomizador. Em função destes fatores é que se utiliza a distribuição granulométrica como forma de representação.

2.2.3.2 MÉTODOS DE REPRESENTAÇÃO DE DADOS

Existem duas formas básicas de representação para expressar a distribuição granulométrica: mediante tabelas e mediante gráficos.

A tabela é o método geral mais preciso de representação de dados, mas possui o inconveniente de ser de difícil interpretação.

O uso de representações gráficas é mais cômodo e a aproximação de uma função matemática de uma distribuição granulométrica pode ser constatada por uma simples observação da representação.

Dentro das representações gráficas são considerados os histogramas, as curvas de distribuição simples e as acumulativas.

→ **Histogramas:** é o meio mais simples de representar um distribuição granulométrica de um atomizado. Neste tipo de gráfico é representada a porcentagem de partículas presentes em um determinado intervalo. O histograma é uma indicação imediata do tamanho de partícula que constitui a maioria da

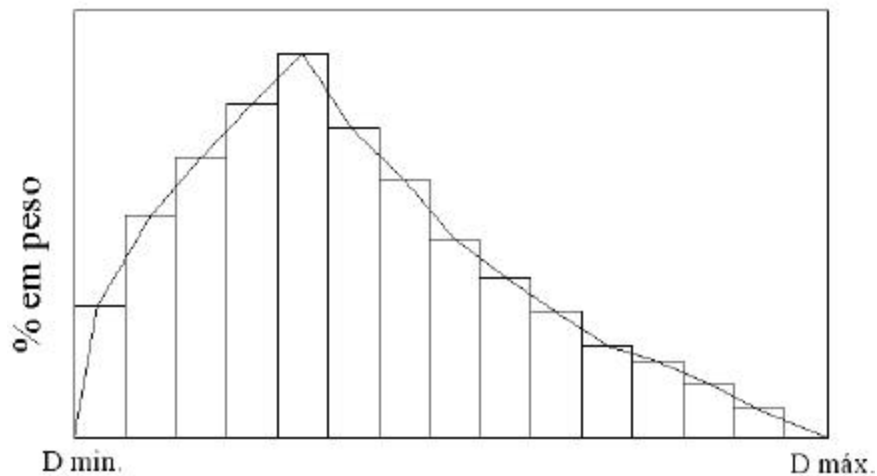


Figura 21 - Distribuição do tamanho de partículas representada na forma de um histograma.

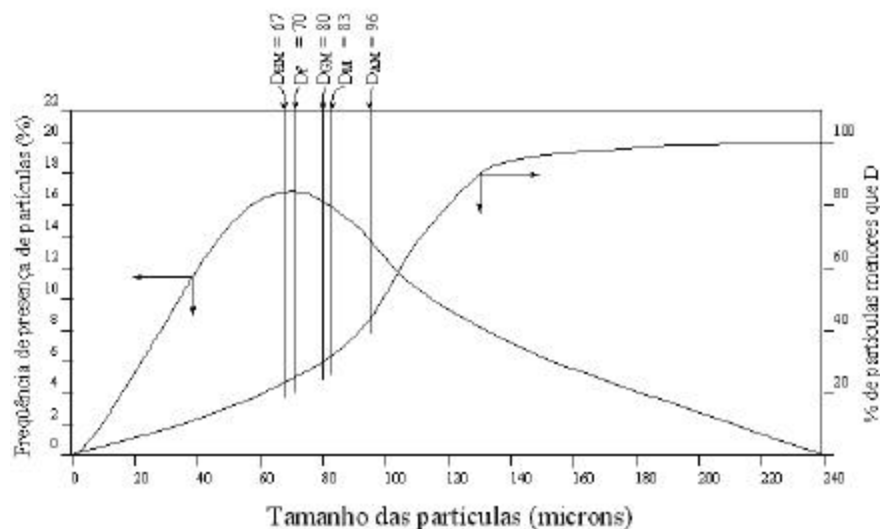


Figura 22- Curvas de distribuição granulométrica.

distribuição (Figura 21).

→ **Curvas de distribuição:** é a representação da frequência relativa de uma variável em um grupo de dados (medida do diâmetro, volume, superfície específica, etc.) (Figura 22).

→ **Curvas acumulativas:** é a representação da distribuição acumulativa realizada ao situar-se graficamente porcentagens acumuladas de partículas maiores ou menores de um determinado tamanho dado frente ao tamanho (Figura 22).

2.2.4 PRINCÍPIOS DA SECAGEM

Para a secagem dos produtos cerâmicos é necessário o estudo das características do ar utilizado e para tal é necessário definir algumas propriedades do ar úmido.

2.2.4.1 AR ÚMIDO

→ **Propriedades do ar úmido**

a) Umidade absoluta: é o conteúdo de umidade de um ar expressado em kg de água/kg de ar seco, e sua representação é X . De acordo com a definição, a umidade absoluta está relacionada com a pressão parcial do vapor de água no ar pela expressão:

$$X = \frac{p_w}{P - p_w} \times \frac{18}{28,9} = 0,622 \frac{p_w}{P - p_w} \quad (1)$$

sendo P a pressão total do sistema.

O ar é dito saturado de umidade quando sua pressão parcial de vapor de água é igual pressão de vapor da água a temperatura em que se encontra o ar. A umidade absoluta nestas condições é denominada "Umidade de saturação" (X_s).

b) Umidade relativa: é a relação entre a quantidade de vapor de água contida em um determinado volume de ar e a que estaria contida se estivesse saturado; é representado por ϕ e pode ser calculado pela equação:

$$f = \frac{P_w}{P_s} \quad (2)$$

onde:

P_w = pressão parcial de vapor de água no ar.

P_s = pressão parcial de saturação da água nesta temperatura.

De (1) e (2):

$$X = 0,622 \frac{P_s \cdot f}{P - P_s \cdot f} \quad (3)$$

que permite calcular a umidade absoluta a partir da umidade relativa.

c) Umidade porcentual: é a relação entre a umidade absoluta do ar e de saturação a esta temperatura.

$$X_P = \frac{X}{X_s} \times 100 \quad (4)$$

d) Volume úmido: é o volume que ocupa um kg de ar seco mais a água que contém (unidades - m³ de ar úmido / kg de ar seco).

e) Densidade do ar úmido: pode ser calculado pela equação dos gases perfeitos. Considerando que P (pressão total) é normalmente 1 atm., o peso molecular médio do ar úmido será:

$$M_m = y_w \times M_w + (1 - y_w) M_a = \frac{P_w}{P} \times M_w + \left(1 - \frac{P_w}{P}\right) M_a = \frac{P_w}{P} M_w + M_a - \frac{P_w}{P} M_a = M_a - \frac{P_w}{P} (M_a - M_w) \quad (5)$$

substituindo na equação dos gases perfeitos:

$$\mathbf{r}_h = \frac{P \cdot M_m}{R \cdot T} = \frac{P \cdot M_a}{R \cdot T} - \frac{P_w}{R \cdot T} (M_a - M_w) \quad (6)$$

$$R = 8310 \text{ J}^\circ\text{K.mol.kg}$$

O primeiro termo da equação representa a densidade do ar seco, em função do qual a densidade do ar úmido é sempre menor que a do seco.

f) Calor úmido: é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura em 1°C de 1 kg

de ar seco mais o vapor de água que esta contido a pressão constante; é representado por s .

$$s = c_a + x c_w \quad (7)$$

No intervalo normal de temperaturas na se desenvolvem as operações de interação ar - água:

$$c_a = 1 \text{ kJ/}^\circ\text{K} \cdot \text{kg ar seco}$$

$$c_w = 1,92 \text{ kJ/}^\circ\text{K} \cdot \text{kg vapor de água}$$

o que resulta em:

$$s = 1 + 1,92 X \quad \text{kJ/}^\circ\text{K} \cdot \text{kg de ar seco}$$

com o qual pode ser apreciado que, em uma mistura de gases perfeitos, o calor úmido é unicamente uma função da umidade.

g) Entalpia do ar úmido: é igual a entalpia do ar seco mais a entalpia da água que o acompanha; é representado por i_G .

$$i_G = i_a + i_w \cdot X \quad (8)$$

Se tomarmos como estado base: $P = 1 \text{ atm.}$; $t = 0^\circ\text{C}$; ar - gás; água - líquida. E o ar esta a $t^\circ\text{C}$, teremos:

$$i_a = c_a(t - 0) \quad \text{Unidade kJ/kg ar seco} \quad (9)$$

$$i_w = c_w(t - 0) + r_o \quad \text{Unidade kJ / kg vapor de água} \quad (10)$$

r_o = calor latente de vaporização da água a 0°C então, da equação (8):

$$i_G = c_a t + c_w X \cdot t + r_o X = t(c_a + c_w \cdot X) + r_o X$$

e, considerando-se a equação (7):

$$i_G = r_o \cdot x + st \quad (11)$$

Em todas as equações supõe-se que os calores específicos do ar e água são constantes.

O valor de r_o é 2479 kJ/kg de água.

h) Temperatura de orvalho: é a temperatura na qual um gás condensa quando umidificado em condições adiabáticas.

→ Diagrama de Mollier para o ar úmido

Representa muitas propriedades do ar úmido e permite a solução gráfica dos problemas relacionados com o ar condicionado, resfriamento de água por evaporação e dessecação.

No diagrama de Mollier estão representados em coordenadas normais o produto $s.t$ em ordenadas em relação a X nas abcissas.

Além disto, representam ainda:

a) Linhas isotérmicas: se multiplicar por t a equação (7), obtêm-se:

$$s.t = 1.t + 1,92.t.X \quad (12)$$

se t é constante, a representação equação (12) será uma reta no diagrama $st = f(X)$. As linhas isotérmicas serão representadas por um feixe de retas divergentes (para cada temperatura).

A inclinação de cada reta será 1,92 e a ordenada na origem t . Com o aumento da temperatura, aumenta a ordenada na origem e a inclinação.

b) Linhas isoentalpicas: se na equação (11) isolamos $s.t$ e levamos em conta que $r_o=2479$ kJ/kg de água, obtêm-se:

Se i_G é constante na representação da equação (13) será também uma reta de inclinação -

$$s.t = i_G - 2479 X \quad (13)$$

2479 e ordenadas na origem i_G (a escala de i_G está localizada no diagrama sobre a curva de $\phi=1$).

c) Linhas com $f = \text{constante}$: possuem forma curva e são construídas a partir das equações (3) e (12). Considerando-se que P esteja fixa (cada diagrama é construído à uma

determinada pressão) na equação (3).

$$x = 0,622 \cdot \frac{P_s f}{P - P_s f} \quad (14)$$

para um valor de $\phi = \text{cte.}$ restam os pares de valores de X e P_s . se a partir deste momento são atribuídos valores a t , então pela equação (3) será possível o cálculo de X .

Uma vez que os valores de X e t são conhecidos então, com a equação (12) é possível calcular o valor de $s.t$ e representar os pares de valores $x - s.t$ para a qual foi eleito.

Como para $t = 0$ ($s.t = 0$), P_s têm um valor diferente de zero (4,59 mmHg), X também será diferente de zero, o que significa dizer que as curvas de ϕ constantes partem de todas de um ponto muito próximo da origem de coordenadas, mas não da origem.

d) Temperatura úmida: é denominada de temperatura de termômetro de bulbo úmido (ou simplesmente temperatura úmida - t_w), a temperatura de estado estacionário (não de equilíbrio) que alcança uma pequena massa de água imersa, em condições adiabáticas, em uma corrente de ar com temperatura e umidade constantes.

No estado estacionário supõe-se que as propriedades físicas do ar não variem, em função da pequena quantidade de água que se vaporiza.

No momento em que o regime estacionário estiver satisfeito, ocorrerá:

Calor fornecido pelo ar (q_a) = Calor gasto pela água (q_v)

$$q_a = (h_c + h_r) A_q (t - t_w) \quad (15)$$

onde:

q_a = calor fornecido pelo ar, W

h_c = coeficiente de transferência de calor por condução e convecção, W/m².°K

h_r = coeficiente de transferência de calor por radiação, W/m².°K

t = temperatura do ar, °C

t_w = temperatura da água. °C

Considerando $a = (h_c + h_r)/h_c$ e a equação (15); fica:

$$q_a = a \cdot h_c \cdot A_q \cdot (t - t_w) \quad (16)$$

além disso:

$$q_v = N_v \cdot 18 \cdot A_v \cdot r_w \quad (17)$$

onde:

- q_v = calor tomado pela água para vaporizar-se, W
 N_v = velocidade de transferência de matéria desde a interface até o ar. mol·kg/m²·s
 A_v = superfície de vaporização da água, m²
 r_w = calor latente de vaporização da água na temperatura t_w , J/kg

$$N_v = k_G \cdot (P_w - P) \quad (18)$$

Mas,

onde:

- k_G = coeficiente individual de transferência de matéria, mol·kg/s·N
 P_w = pressão parcial de água na interface (coincide com a de saturação), N/m²
 P = pressão parcial de água no gás, N/m²

Levando em conta a equação (1):

$$X = \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{P}{P - p}$$

$$X_w = \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{P_w}{P - P_w}$$

(19)

$$N_v = k_G \cdot \frac{M_a}{M_w} \{X_w (P - P_w) - X (P - p)\} \quad (20)$$

De (18) e (19) resulta:

Por outro lado, $P - P_w$ e $P - p$ (o erro é menor que 1%) e substituindo-as pela sua média logarítmica:

$$(P - p)_{ml} = \frac{(P - p) - (P - p_w)}{\ln \frac{P - p}{P - p_w}}$$

(21)

Substituindo na equação (20) obtêm-se:

$$N_v \cdot M_w = k_G \cdot M_a (P - p)_{ml} (X_w - X)$$

(22)

$$N_v \cdot M_w = k' (X_w - X)$$

(23)

$$a \cdot h_c \cdot A_q \cdot (t - t_w) = k' \cdot A_v \cdot (X_w - X) \cdot r_w$$

(24)

$$\frac{X_w - X}{t_w - t} = - \frac{a \cdot h_c}{k' \cdot r_w}$$

(25)

Denominando de k' (kg água/s.m²) o produto $k_G \cdot M_a (P - p)_{ml}$, e substituindo na equação (22):

Igualando as expressões resultantes para os calores cedidos e tomados pela água:

nesta equação pode ser admitido normalmente que $A_q = A_v$ e reordenando os termos têm-se:

Foram realizados um grande número de experimentos (Masters, 1979) de determinação de temperaturas úmidas aplicando a equação (25); estes experimentos abraçam amplos intervalos de todas as variáveis e deduziram um valor médio do quociente $h_c/k' \cdot s = 0,945$ (sendo s o calor úmido do ar utilizado) para velocidades do ar de 3,8 à 10 m/s ($t = 21^\circ\text{C}$, $P=1\text{atm}$).

Por outro lado, ao representar a variação de a com a velocidade linear encontraram curvas como as representadas na Figura 23.

O que significa dizer que, para velocidades lineares do ar de 5 m/s o valor de α é igual a 1,058. Com estes dados, a equação (25) se transforma em:

$$\frac{X_w - X}{t_w - t} = - 1,058 \cdot 0,95 s/r_w = - \frac{s}{s_w} \quad (25a)$$

que é idêntica à que obteríamos para um processo de saturação adiabática. Ou seja, que nas condições indicadas para o sistema ar-água, a temperatura úmida e a de saturação adiabática coincidem.

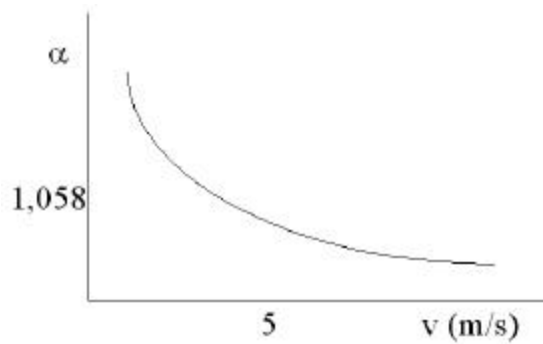


Figura 23 - Representação de α em relação a velocidade.

Para velocidades do ar superiores a indicada, com o valor de α ligeiramente inferior, a temperatura úmida resultante será também ligeiramente menor que a de saturação adiabática.

Em geral, e com suficiente aproximação é possível afirmar que no sistema ar-água mantém-se a relação:

$$\frac{h_c}{k' \cdot s} = 1 \quad (25b)$$

que é conhecida como a relação de Lewis.

Para outros sistemas, esta relação difere bastante da unidade, sendo por tanto distintas a temperatura úmida e a de saturação adiabática. A importância disto reside no fato de, mediante a duas medidas diretas e simples, podem ser conhecidas as características da mistura ar-água (umidade absoluta, relativa e entalpia).

Assim, quando são conhecidas a temperatura seca (t) e a temperatura úmida (t_w) de um determinado ar, bastará localizar no diagrama de Mollier o ponto de corte da isoterma

com a curva $\phi=1$ e deste ponto traçar uma isoentálpica; o ponto de corte da isoentálpica com a isoterma t é o ponto representativo do dito ar.

2.2.4.2 SÓLIDOS ÚMIDOS

Propriedades dos sólidos úmidos

Primeiro deve existir uma diferenciação entre sólidos propriamente úmidos e sólidos higroscópicos. Os sólidos propriamente úmidos são aqueles nos quais a pressão de vapor de água na interface (também chamada de pressão de equilíbrio) não depende da quantidade de umidade do sólido, e sim somente da temperatura. É escrita como:

$$P_{eq.} = \ddot{O} \text{ (Temperatura do sólido e Temperatura ambiente)}$$

Estes sólidos são insolúveis em água e não apresentam afinidade química com ela.

Os sólidos higroscópicos apresentam uma pressão de equilíbrio que varia com a umidade do sólido, pelo menos dentro de uns limites da dita umidade. Fora destes limites, se comportam como um sólido propriamente úmido. Ou seja:

$$P_{eq.} = \ddot{O}M \text{ (conteúdo de umidade, Temperatura do sólido, Temperatura ambiente, natureza do sólido)}$$

A maioria das substâncias pertencem a este grupo. Podem ser insolúveis ou totalmente solúveis.

a) Conteúdo de umidade: é a quantidade de água que o sólido contém, e pode ser expressa de duas formas:

sobre base seca: $\longrightarrow \hat{o} \longrightarrow (\text{kg de água/kg de sólido seco}) \longrightarrow \text{Razão mássica}$

sobre base úmida: $\longrightarrow \hat{o}/\hat{o}+1 \longrightarrow (\text{kg de água/kg de sólido úmido}) \longrightarrow \text{Fração mássica}$

b) Umidade de equilíbrio: é a quantidade de umidade de um sólido que está em equilíbrio com o ar a determinada temperatura e umidade relativa. É normalmente expressa em base seca, e denominada de \hat{o}_e .

c) Umidade livre: é a umidade em excesso sobre a de equilíbrio, ou seja, é a umidade eliminável pelo sólido ao entrar em contato com o ar a uma determinada temperatura e

umidade relativa, e é representada por W .

$$W = t - t_e$$

(26)

A umidade livre (W) depende da umidade do sólido e da umidade relativa do ar (ϕ), uma vez que ao se modificar altera (ϕ_e).

d) Umidade ligada: é o líquido contido pelo sólido que exerce uma pressão de vapor menor do que a do líquido puro a mesma temperatura. Isto implica em que a presença do sólido influi na volatilidade da água, em função do qual deve admitir-se que a água está ligada ao sólido por algum tipo de força.

e) Umidade não ligada: é a quantidade de umidade que um sólido contém em excesso sobre a ligada. Esta umidade exerce na interface uma pressão parcial igual a de vapor na dita temperatura.

Convém ressaltar que enquanto a umidade ligada e a não ligada dependem unicamente do corpo, a umidade de equilíbrio e a umidade livre dependem do corpo e do ar que o circunda.

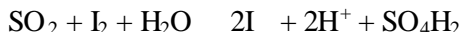
Métodos para determinar a umidade nos sólidos úmidos

Podem ser usados dois tipos de métodos, os diretos e os indiretos.

a) Métodos diretos: se baseiam em eliminar a água contida no sólido, determinando o quanto foi eliminado pela via química ou por pesagem. São os processos mais exatos, e entre eles estão:

- Secagem em estufa à vácuo, que utiliza temperaturas relativamente baixas e vácuo elevado. É importante trabalhar em condições constantes para cada material com o objetivo de comprovar os resultados. Em alguns casos este é o único procedimento útil, uma vez que aplicar temperaturas elevadas pode decompor o material analisado.
- Secagem em estufa na pressão atmosférica: é comum neste tipo de estufa a presença da circulação de ar. É um processo mais rápido do que o anterior já que necessita de temperaturas mais elevadas.

- Métodos que utilizam o reativo de "Karl-Fisher", que se baseiam na reação química:



valorizando o I_2 não reacionado ou I^- formado.

- Métodos que utilizam a formação de um gás. Por exemplo, o tratamento da argila com carbureto de cálcio que resulta em acetileno.

b) Métodos indiretos: se baseiam na medida de alguma propriedade do material que é afetada pela maior ou menor quantidade de umidade do mesmo.

2.2.4.3 EQUILÍBRIO EM DESSECAÇÃO

Métodos de determinação da curva de equilíbrio

A linha de equilíbrio é a representação gráfica da relação quantitativa existente entre o conteúdo de umidade de um sólido e a umidade relativa do ar que esta em contato com ele, quando é alcançado o estado em que o sólido não ganha nem perde umidade. Estas curvas se denominam isotermas de adsorção.

Quando é colocado em contato com um sólido com certas condições de umidade ($\hat{\theta}$) e um ar de umidade relativa ϕ , o sólido ganhará ou perderá umidade segundo se encontre o ponto representativo em uma ou outra parte da curva de equilíbrio. Na Figura 24, o ponto **A** indica que o sólido ganhará umidade aproximando-se do equilíbrio e o ponto **B** indica que o sólido perderá umidade. A curva de equilíbrio é de importância fundamental no estudo de um processo de secagem, em função disto é importante saber como determinar os dados de equilíbrio. Para casos que não possuam dados na bibliografia, existem dois procedimentos:

a) **Método estático:** consiste em colocar pequenas quantidades da amostra examinada em um recipiente, no interior do qual a umidade do ar e a temperatura são mantidas constantes. Após um determinado espaço de tempo é estabelecido o equilíbrio entre a porcentagem de umidade da amostra e o ambiente do recinto em que se encontra, o peso desta será constante e em função disto se pode obter um ponto da isoterma.

Para obter uma umidade do ar sempre constante, são utilizadas soluções salinas ou de ácido sulfúrico de determinada concentração. Os ensaios são realizados em estufas de secagem com regulagem de temperatura, em recipientes herméticos.

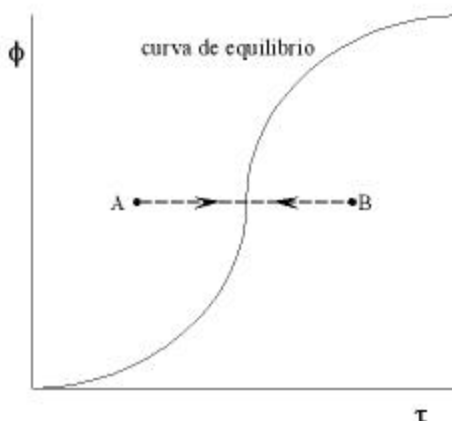


Figura 24 - Representação da curva de equilíbrio.

- b) **Método dinâmico:** para a aplicação deste método é necessário um dispositivo no qual seja possível controlar uma corrente de ar em uma dissolução saturada de um determinado sal, que alcance a umidade relativa desejada (a temperatura deve manter-se constante), para passar depois por um recipiente onde ficam retidas todas as partículas de líquido arrastadas e o ar se coloca em contato com o material cuja curva de equilíbrio se deseja determinar. Posteriormente é determinada a umidade do sólido por pesagem.

Formas das curvas de equilíbrio

É feita uma distinção entre sólidos insolúveis higroscópicos e sólidos solúveis higroscópicos.

- a) **Sólidos insolúveis higroscópicos:** a variação da umidade de equilíbrio ($\hat{\omega}_e$) com a umidade relativa do ar ocorre da forma indicada na Figura 25. Estas curvas são muito parecidas com as de equilíbrio de adsorção, por isto têm-se tentado interpretar estas curvas como se trata-se de uma adsorção física de um vapor sobre um sólido.

Com o apoio desta teoria e considerando que as curvas de equilíbrio sofrem com frequência o efeito da histerese, análogo ao que se apresenta na adsorção. Com efeito, segundo a umidade inicial do produto seja baixa ou alta, são obtidas curvas de equilíbrio ligeiramente distintas (Figura 26).

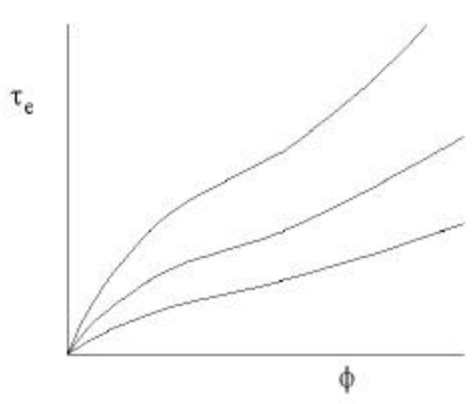


Figura 25- Variação da umidade de equilíbrio com a umidade relativa do ar.

Se esta teoria pode ser aplicada na equação que se deduz da teoria BET (Brunauer, Emmet e Teller) para a adsorção física em forma de capas multi-moleculares.

Esta teoria liga a umidade relativa ambiente e a umidade de equilíbrio do sólido mediante a expressão:

$$t_e = t_1 \cdot \frac{K f}{1 - f} \cdot \frac{1 - (n+1)f^n + n f^{n+1}}{1 + (K-1)f - K f^{n+1}} \quad (27)$$

onde:

$\hat{o}_e \rightarrow$ umidade de equilíbrio

$\hat{o}_1 \rightarrow$ umidade do sólido correspondente a adsorção de uma camada monomolecular

$\phi \rightarrow$ umidade relativa do sólido

$n \rightarrow$ número de capas adsorvidas

$K \rightarrow$ constante característica do sólido

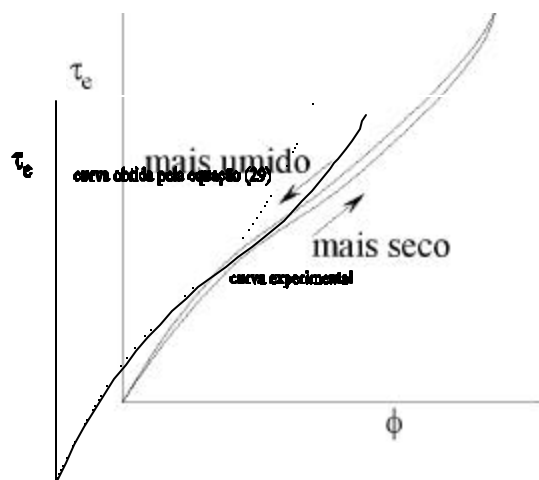


Figura 26 - Curvas de equilíbrio.

Figura 27 - Representação da curva definida pela equação 29 e da respectiva curva experimental.

$$t_e = t_l \frac{K.f}{1 + K.f} \quad (28)$$

e como não existe nada que limite o número de camadas moleculares que podem adsorver, quando $n \rightarrow \infty$, a equação (28) toma a forma:

$$t_e = t_l \frac{K f}{1 - f} \frac{K f}{(1 - f)(1 - f + K f)} \quad (29)$$

Para $n \rightarrow 1$ encontra-se a fórmula de Langmuir:

Comprovou-se que a equação (29) reproduz com bastante fidelidade os resultados experimentais para as umidades relativas do ar compreendidas entre 0 e 35%. Para valores superiores a curva experimental sofre um desvio, o que indica que a umidade retida não obedece a teoria de adsorção (Figura 27).

Para poder empregar a equação 29 é necessário conhecer os valores de \hat{o}_1 e K para cada caso. Se efetuamos operações na dita equação, pode-se obter:

que é a equação de uma reta. Dispondo os dados experimentais de $\hat{o}_e = f(\phi)$, pode-se representar $\phi/\hat{o}_e(1-\phi)$ em relação a ϕ e da reta obtida pode-se calcular a inclinação e a

$$\frac{f}{t_e(1-f)} = \frac{K-1}{t_l K} f + \frac{1}{t_l K}$$

ordenada de origem, e com elas \hat{o}_1 e K.

Influência da temperatura: para um mesmo sólido e uma umidade relativa do ar constante, verifica-se que a umidade de equilíbrio do sólido diminui quando aumenta a temperatura. Ou seja, a curva de equilíbrio aproxima-se do eixo das abcissas.

b) **Sólidos solúveis higroscópicos:** os sólidos que são solúveis no líquido que contém apresentam normalmente curvas de equilíbrio totalmente diferentes do descrito anteriormente. Quando a pressão parcial do vapor de água no ar é inferior a pressão de vapor da dissolução saturada, a umidade de equilíbrio do sólido pode ser muito pequena. No caso contrário, o sólido adsorve umidade do ambiente e se dissolve, formando em primeiro lugar uma dissolução saturada cuja tensão de vapor é inferior à do líquido puro, segundo a lei de Raoult. Se a pressão parcial de vapor no ar permanece constante, o equilíbrio só é alcançado quando for igualado pela tensão de vapor da dissolução; para isto é necessário que diminua a concentração da dissolução, o qual só é possível quando todo o sólido estiver dissolvido, e a dissolução resultante tenha uma certa concentração.

Quando uma dissolução está em contato com o ar de umidade relativa inferior à de equilíbrio, este tende a concentrar-se. Se a umidade relativa do ar é todavia menor que a de equilíbrio com a dissolução saturada, se chegará a produzir a precipitação do sólido. Nos sólidos solúveis a umidade ligada é infinita e a não ligada é nula.

2.2.4.4 CINÉTICA DE SECAGEM DAS GOTAS DE ATOMIZADO

As características de secagem das gotas durante a secagem por atomização são representadas pela variação da velocidade de evaporação e das variações na temperatura na gota e na pressão de vapor quando diminui a quantidade de umidade da mesma. A Figura 28 mostra a variação da temperatura da gota (com uma quantidade de sólidos de 50%), em presença de ar aquecido.

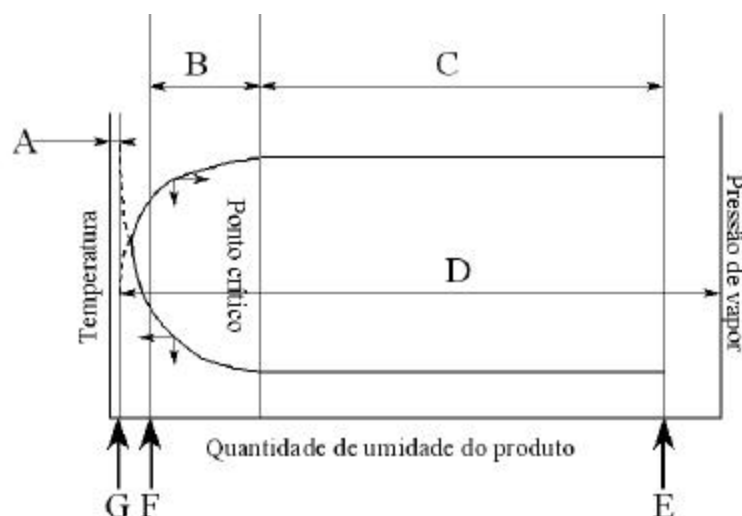


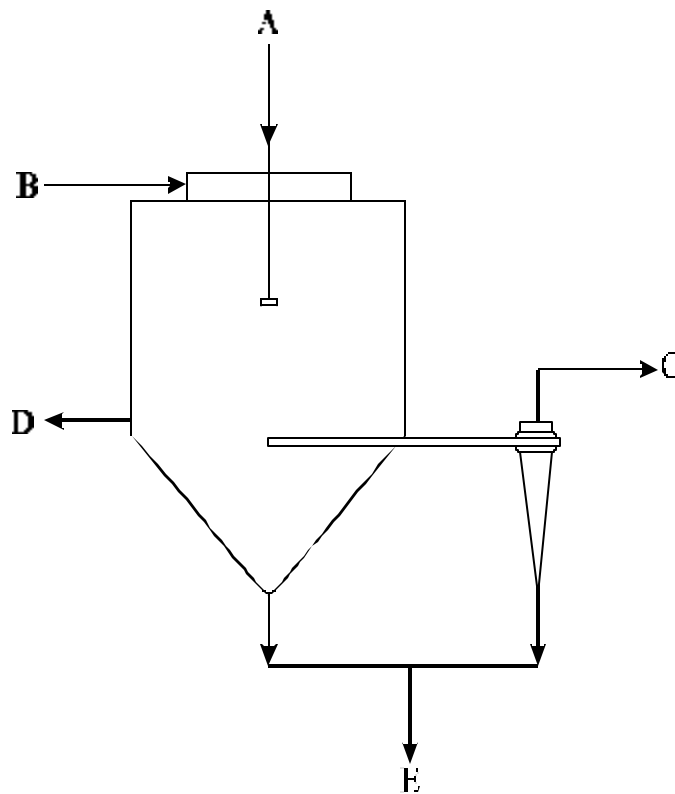
Figura 28 - Características da secagem das gotas durante a atomização.

- | | |
|---|---------------------------------|
| A - Temperatura do ar de secagem na saída | E - Alimentação do atomizador |
| B - Evaporação em velocidade decrescente | F - Umidade residual do produto |
| C - Evaporação em velocidade constante | G - Umidade de equilíbrio |
| D - Pressão de vapor de água no ar de saída | |

A Figura 28 mostra como, ainda que o produto esteja em contato com o ar quente, em nenhuma etapa do processo a temperatura do produto chega a ser suficiente para causar degradação térmica do mesmo. O produto atomizado sai do secador muito antes de que tenha tido tempo de alcançar a temperatura do ar de saída. Assim mesmo a Figura 28 mostra a troca de pressão de vapor durante a secagem das gotas de atomizado. Durante o período inicial de secagem a pressão de vapor esta amarrada a temperatura úmida do ar. Neste período, o ganho energético é insuficiente para realizar a secagem das gotas, em função disto, para manter velocidades de secagem altas, o ar úmido e frio que se encontra ao redor das gotas deve ser substituído por ar aquecido e seco.

2.2.4.5 BALANÇO DE MATÉRIA E ENERGIA EM ATOMIZADORES

Na Figura 29 esta representado o esquema de um atomizador com as entradas e saídas de matéria e energia.



$$A = (M_s), (T_{s1}), (Q_{s1}), (W_{s1})$$

$$B = (G_a); (T_{a1}); (Q_{a1}); (H_1)$$

$$C = (G_a); (T_{a2}); (Q_{a2}); (H_2)$$

$$D = Q_{\text{perda}}$$

$$E = (M_s), (T_{s2}), (Q_{s2}), (W_{s2})$$

Figura 29- Dados de secagem para o cálculo dos balanços de matéria e de energia.

Nomenclatura:

M_s Vazão do

sólido seco na entrada (barbotina), kg de sólido seco / hora;

τ kg de água / kg de sólido seco;

T_s Temperatura do sólido;

G_a Vazão de ar seco na entrada, kg de ar seco / hora;

X Umidade absoluta, kg de água / kg sólido seco.

Balanço de água:

Água que entra com a barbotina

$$M_s \hat{o}_1$$

Água que entra com o ar quente

$$G_a X_1$$

Água que sai com o produto

$$M_s \hat{o}_2$$

Água que sai com o ar

$$G_a X_2$$

Logo:

Balance energético:

Entalpia do ar na entrada	$G_a \quad i_{a1}$
Entalpia da barbotina	$M_s \quad i_{s1}$
Entalpia do ar na saída	$G_a \quad i_{a2}$

$$i_G = s \Delta T + r_o X$$

$$G_a i_{a1} + M_s i_{s1} = G_a i_{a2} + M_s i_{s2} + Q_L \quad (34) \quad (37)$$

Entalpia do sólido na saída	$M_s \quad i_{s2}$
-----------------------------	--------------------

Logo:

Q_L calor perdido

$$Q_L = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (35)$$

$$M_s \cdot t_1 + G_a \cdot X_1 = M_s \cdot t_2 + G_a \cdot X_2$$

$$M_s \cdot (t_1 - t_2) = G_a (X_2 - X_1) \quad (33)$$

A perda de calor pode ser expressa como:

$$i_{s1} = C_{Ds} \Delta T + t_1 \cdot C_W \cdot \Delta T \quad (36)$$

para câmaras bem isoladas o calor perdido é pequeno. A entalpia do alimento i_{s1} é a soma da entalpia do sólido e a da água, e pode ser expressa por:

na qual:

- C_{Ds} é a capacidade calorífica do sólido seco;
- C_W é a capacidade calorífica da água;
- T é a diferença de temperatura entre o alimento e a referência (0oC).

A entalpia do ar é expressa por meio do calor úmido:

2.2.4.6 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência térmica é uma expressão do funcionamento do atomizador e na pratica o termo se refere a energia necessária para produzir uma unidade de produto seco com as características desejadas.

O projeto do atomizador têm por objetivo alcançar as características desejadas do produto, com a eficiência térmica mais alta possível. E esta eficiência térmica é definida como a relação entre a energia utilizada na evaporação e a energia fornecida.

A eficiência térmica aumenta quando aumenta-se a temperatura do ar que entra no atomizador e a temperatura do ar de saída seja a mais baixa possível.

A energia fornecida é proporcional a velocidade de evaporação e esta varia sensivelmente com a quantidade de sólidos na barbotina. Na tabela 2 pode ser observado como afeta a variação da quantidade de sólidos na produção do atomizador.

O ar aquecido entra no atomizador e sua temperatura se reduz, devido a evaporação da água da barbotina. Se a câmara é bem isolada, as perdas energéticas serão pequenas e desprezíveis e a diminuição da temperatura do ar pode ser considerada como a que segue uma linha de resfriamento adiabático. E a evaporação máxima é obtida quando o ar de saída está saturado. Isto não ocorre na pratica.

Cálculo da eficiência térmica

Se o ar que entra no atomizador a temperatura T_1 , proveniente da câmara de combustão, na qual entra a temperatura ambiente T_0 , e durante o processo de secagem a temperatura decresce até a temperatura T_2 , a eficiência do processo pode ser expressa como segue:

- 1) **Eficiência térmica global:** é definida como a fração da energia total utilizada na secagem, e pode ser expressa aproximadamente como:

$$h_t = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \right) \cdot 100 \quad (38)$$

onde T_2 é a temperatura de saída, se a operação é verdadeiramente adiabática.

Pode-se observar que quando são mantidas as condições de saída e ambientais, a eficiência térmica global aumenta rapidamente ao aumentar a temperatura de entrada.

- 2) **Eficiência evaporativa:** é definida como a relação entre a capacidade de evaporação real e a capacidade de evaporação máxima (umidade relativa do ar na saída, $\phi = 1$). E pode ser expressa aproximadamente como:

$$h_e = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{sat.}} \right) \cdot 100$$

onde T_{sat} é a temperatura de saturação adiabática.

Ainda que, possam ser obtidas temperaturas altas do ar que entra na câmara de atomização, as limitações do aumento de temperatura são:

- Existe um nível máximo de temperaturas, para valores acima deste, o calor afeta o atomizado causando perda de qualidade do produto.
- O custo do ar aquecido pode alcançar um máximo em função da temperatura.
- Em pequenos atomizadores, ao aumentar a temperatura de entrada, aumenta a vazão de barbotina de modo que a câmara de atomização fique sobrecarregada.

Efeito das variáveis de operação sobre o consumo energético

- 1) **Efeito da temperatura de entrada:** o aumento da temperatura de entrada do ar diminui a energia necessária para a secagem, para uma determinada vazão do produto. O consumo energético do atomizador é expresso de dois modos: como consumo energético por unidade de água evaporada (Joule/Kg de água evaporada) ou consumo de energético por unidade de produto atomizado (Joule/Kg de pó atomizado).
- 2) **Efeito da diferença de temperaturas de secagem:** quanto maior é a diferença de temperatura do ar entre a entrada e a saída, menor é o gasto energético por unidade de produto. E esta diferença pode ser obtida com o aumento da temperatura de entrada ou com a diminuição da temperatura de saída, ainda que isto conduz a uma unidade residual maior.
- 3) **Efeito da reciclagem do ar:** nas plantas convencionais de atomização todo o ar é emitido para a atmosfera, o que representa uma perda de energia. Especialmente se a temperatura de saída é alta, por exemplo, quando se deseja obter uma umidade residual específica no produto.

A reciclagem (10-15%) do ar de saída proporciona uma redução do consumo energético, mas se está reciclando uma porcentagem importante, que podem apresentar problemas devido o aumento de umidade na câmara de secagem.

A	B	Incremento de produção (%)							C	Economia de energia (%)					
		Quantidade de sólidos inicial (%)								Quantidade de sólido inicial (%)					
58	1.596	-	-	-	-	-	-	-	565	-	-	-	-	-	-
60	1.747	9.4	-	-	-	-	-	-	517	8.5	-	-	-	-	-

62	1.917	20.1	9.7	-	-	-	-	-	472	16.5	8.7	-	-	-	-	-
64	2.109	32.2	20.7	10.0	-	-	-	-	431	23.7	16.6	8.7	-	-	-	-
66	2.328	45.9	33.3	21.5	10.4	-	-	-	391	30.8	24.4	17.2	9.3	-	-	-
68	2.581	61.7	47.7	34.6	22.4	10.8	-	-	355	37.2	31.3	24.8	17.6	9.4	-	-
70	2.876	80.2	64.6	50.0	36.3	23.5	11.4	-	320	43.4	38.1	32.2	25.7	18.2	9.6	-
72	3.222	101.2	84.4	68.1	52.7	38.4	28.4	13.4	290	48.7	43.9	38.6	32.7	25.8	18.3	9.4

A Quantidade de sólidos na barbotina [(kg sol./kg barbotina)x 100]

B Produção [kg atomizado/kg H₂O evaporado]

C Consumo [Joule / kg atomizado]

Tabela 2 - Relação da produção e consumo energético no processo de atomização ao aumentar a quantidade de sólidos da barbotina.

Até 20% de economia de combustível pode ser obtido ao utilizar as técnicas de recirculação parcial do ar à 120°C. Para que o efeito seja interessante, é necessário:

- Temperatura do ar de saída próximo dos 120°C.
- Produtos resistentes a temperatura.
- Efeito da temperatura da barbotina.

O aumento da temperatura da barbotina reduz o consumo energético. O pré-aquecimento da barbotina é realizado para:

- Reduzir a viscosidade da barbotina.
- Impedir a cristalização do alimento, que pode causar bloqueios no atomizador.

2.3 AS EQUAÇÕES QUE REGEM O PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO

Secagem através de atomização é um processo pelo qual uma corrente líquida, uma pasta ou uma suspensão coloidal, entra em contato com um meio de secagem para produzir um material sólido particulado. Para realizar esta operação com o máximo de eficiência, é utilizado um fenômeno físico específico, isto é, a acentuação das características de transferência simultânea de calor e massa.

Uma solução de alimentação entra em contato com uma corrente de gás previamente aquecido, corrente esta, que é denominada de *concorrente* quando possui o

mesmo sentido da corrente de alimentação, e de *contracorrente* quando possui o sentido inverso desta corrente (Figuras 30 e 31). Inicialmente, ao entrar na câmara de reação a solução é atomizada usando uma, de uma variedade de bicos, os produzem a distribuição do tamanho de gotas. O processo de atomização cria uma grande área de superfície de gotas mais ou menos esféricas, as quais são intimamente contatadas pela corrente de gás aquecido. A criação desta área superficial é crucial para a acentuação do processo de transferência de calor e de massa.

Considerando a massa de um líquido M na forma de uma gota esférica de diâmetro d_{do} (Figura 32), a superfície externa é dada por:

$$S_o = \pi \cdot d_{do}^2 \quad (40)$$

e o volume da gota por:

$$V_o = \frac{\pi \cdot d_{do}^3}{6} \quad (41)$$

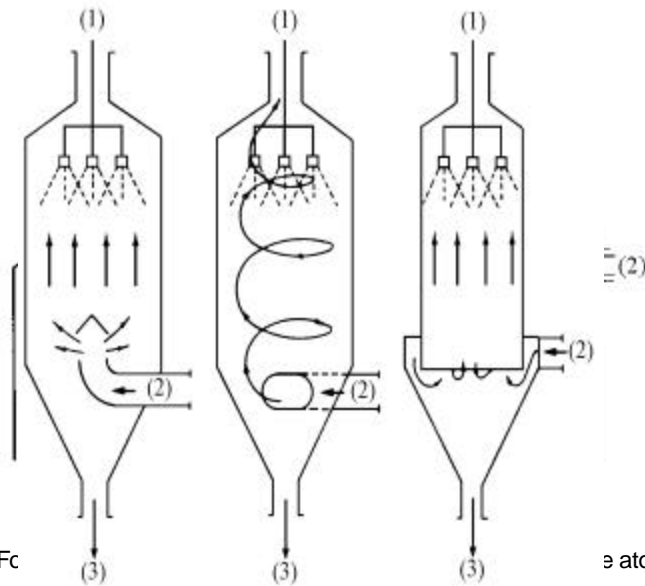


Figura 30- Fc

Alimentação, (2) Entrada de gás, (3) Produto. (Marshall, 1954)

Figura 31 - Formas de introdução do ar nos secadores *contracorrentes* de atomização. (1) Alimentação; (2) Entrada de gás; (3) Produto. (Marshall, 1954)

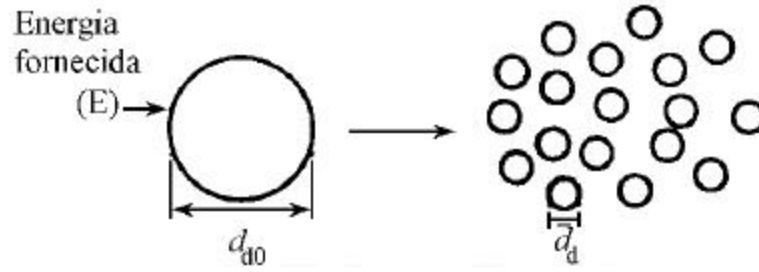


Figura 32- Criação de gotas pelo acréscimo de energia em uma grande esfera de líquido. $E = E_M + E_S$ onde E_M é a energia fornecida as gotas na transferência de impulso e E_S é a energia necessária para produzir uma determinada nova área de superfície ($E_M > E_S$).

Se a gota é dividida por alguma forma de transferência de energia em um número discreto de gotas esféricas de igual tamanho de diâmetro d , então:

$$n = \frac{d_{d0}^3}{d_d^3}$$

(42)

onde n é o número de gotas. E a nova superfície é dada por S_{NOVA} :

$$S_{NOVA} = \frac{d_{d0}^3}{d_d^3} \cdot p \cdot d^2 = p \cdot \frac{d_{d0}^3}{d_d} \quad (43)$$

Assim, o aumento de área é:

$$S_I = p d_{d0}^3 \left(\frac{1}{d_d} - \frac{1}{d_d} 0 \right) \quad (44)$$

e a razão da nova área em relação a original é dada pela equação 45 (Figura 33).

$$R = \frac{p \cdot d_{d0}^3}{p \cdot d_d 0^2} \quad (45)$$

Para produzir um sólido partindo de uma gota líquida que contenha sólidos, é necessário que ocorra a evaporação do solvente, seguida pela solidificação da gota, na medida que as condições de saturação são mantidas. Isto é realizado através do duplo mecanismo de transferência de calor e de massa, os quais são fenômenos chave no processo de secagem por atomização (Marshall, 1954). A criação de uma grande superfície externa de contato

acentua estes mecanismos, através do qual a evaporação e a secagem são obtidas com rapidez.

Uma grande quantidade de trabalhos estão disponíveis na literatura sobre o processo de secagem por atomização. Marshall (1954), Mochida & Kinuta (1973), Dombrowski & Munday (1968) e Masters (1975) esboçaram os princípios básicos e discutiram em detalhes o efeito da atomização no processo e na natureza da forma do produto. O mecanismo da transferência de calor e de massa e a interação entre a gota e o gás de secagem foram estudados por muitos pesquisadores, notadamente por Froessling (1938), Ranz & Marshall (1952), Gauvin & Dlouhy (1960), Gauvin & Baltas (1969), Gauvin & Katta (1975, 1976) e Law (1977).

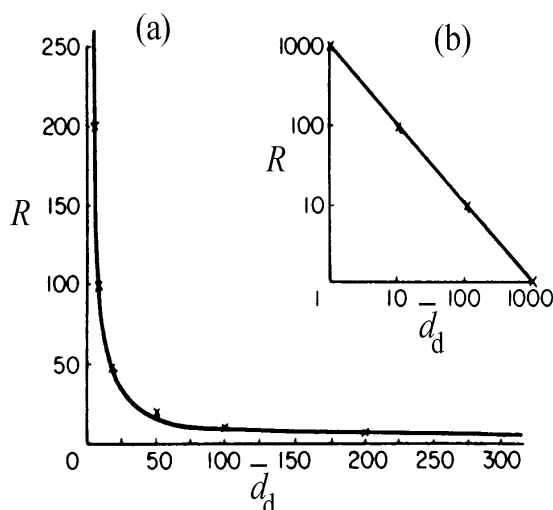


Figura 33 - Efeito do tamanho da gota na área de superfície total disponível para contato com uma corrente de gás. A razão da área "R" é calculada em relação ao tamanho da gota onde $d_0=1000\mu\text{m}$.

Finalmente, algumas das vantagens e desvantagens desta técnica estão resumidas em termos do conhecimento atual do processo:

® Vantagens:

O processo de atomização cria grandes áreas de contato. Na operação que segue o sentido da corrente de gás, permite a realização da secagem de materiais sensíveis ao calor (Marshall, 1954). Este fato possibilita que o processo de atomização seja empregado nas indústrias de alimentos, farmacêuticas e químicas. Na operação que segue o sentido contrário ao do gás (contracorrente), a medida que a evaporação ocorre e o material sólido é formado, a temperatura da gota aumenta, o que aumenta a eficiência térmica global do processo, pois temperaturas mais elevadas são permitidas. A forma do produto final é apropriada para um

maior processamento em termos de transporte e manuseio ou estágios subsequentes da reação (Masters, 1975).

A variação das temperaturas operacionais é ampla e a eficiência de evaporação é comparável com a que ocorre em outros tipos de secadores diretos. Outras vantagens econômicas provêm da forma controlável em muitos casos do produto, ao qual na medida em que aumenta de peso pode ser mais benéfico do que as considerações de energia.

® Desvantagens:

Existem limites específicos as condições operacionais, aos quais podem ser colocadas em termos da forma construtiva da torre de atomização e da forma das gotas geradas (Marshall, 1954). Por exemplo, gotas de partículas não deveriam tocar as paredes da torre de atomização.

As gotas não devem ser carregadas pela corrente de gás na saída, gerando a necessidade da existência de um dispositivo de separação gás-sólido neste ponto (Johnstone, 1972).

A solução que chega ao bico de atomização geralmente, contém de 0~30% de sólidos. A carga evaporativa, portanto é grande e a operação é relativamente dispendiosa em termos de energia.

Problemas de sujeira são freqüentemente encontrados na secagem por atomizadores. E são dependentes das condições térmicas, características da atomização e da natureza do produto sólido (Simon, 1976).

2.3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NAS GOTAS

Quando uma gota entra em contato com uma corrente aquecida de gás, a transferência de calor para ela e o transporte de massa por evaporação do líquido da gota é estabelecida. O calor é transferido da corrente de gás por condução e por convecção. A evaporação do líquido na superfície da gota causa o transporte de vapor por difusão seguido por convecção, quando ocasionada por uma corrente de gás de grande volume. A medida que a evaporação nas gotas progride, um sólido seco é gerado e a umidade do gás de contato aumenta gradativamente (Topley, 1927; Marshall, 1955; Fuchs, 1959; Soo, 1967).

Froessling (1938) derivou um conjunto de equações que descrevem os processos físicos necessários para realizar a evaporação de uma gota esférica. Pode ser demonstrado

que o coeficiente de transferência de calor pode ser obtido dos seguintes grupos adimensionais:

$$\text{Nussel} \rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = Nu = fn(Re, Pr) \quad (46)$$

e similarmente, o análogo da transferência de massa:

$$\text{Sherwood} \rightarrow \frac{\partial r}{\partial x} \Big|_{x=0} = Sh = fn(Re, Sc) \quad (47)$$

É relevante considerar os dois casos principais, onde a interação dinâmica entre as gotas e gás controlam parcialmente os fenômenos de transferência de calor e de massa. Ocorrem normalmente dois períodos principais de evaporação (Coulson, 1968):

- 1) Inicialmente, existe uma velocidade relativamente alta entre as gotas que estão saindo do bico de atomização e a corrente de gás de secagem. Isto produz altas taxas de transferência de calor e de massa.
- 2) A medida que as gotas deixam o ambiente do esguicho, elas rapidamente transferem o impulso e, dependendo da diferença de velocidades, atingem rapidamente a velocidade terminal de queda. Isto é, a diferença velocidades tende a aproximar-se de zero, causando uma diminuição nas taxas de transferência de calor e de massa. O tempo gasto em ambas as regiões, porém, é tanto que muito freqüentemente a quantidade de massa transferida ocorre em uma região delimitada onde a diferença de velocidades tende a zero.

2.3.1.1 VELOCIDADE RELATIVA ENTRE GOTA E GÁS DESPREZÍVEL

Considerando o período (2) descrito anteriormente, então $(U_d - U_g) \approx 0$ e $Re \approx 0$. A solução da diferencial de Froessling para a transferência de calor e de massa e das equações de transferência de impulso, prevêem que tanto Nu e Sh tendem a um valor constante e igual a 2.

$$Nu = \frac{h_c d_d}{k} = 2 \quad (48)$$

onde k é a condutividade térmica da camada de gás e h_c é o coeficiente de transferência de calor, e:

$$S_h = \frac{k_g \cdot M_m \cdot d_d \cdot f_g}{D} = 2 \quad (49)$$

onde k_g é o coeficiente de difusão de transferência de massa, M_m é o peso molecular da mistura gás-vapor, e D é o coeficiente de difusividade. Da equação 48:

$$h_c = \frac{2k}{d_d} \quad \text{isto é} \quad h_c \propto \frac{1}{d_d}$$

isto é, que quanto menor a gota, maior os coeficientes de transferência de calor e de massa.

A equação geral para a taxa de transferência de calor pode ser escrita como (Marshall, 1954):

$$q = h_c A \Delta T \quad (50)$$

A substituição da equação 48 na equação 50 resulta em:

$$q = 2 d_d k \Delta T \quad (51)$$

isto é, a taxa global de transferência de calor para uma corrente de gás constante para uma gota é proporcional ao diâmetro desta.

A taxa de transferência de massa W pode ser descrita em termos da taxa de evaporação da superfície saturada, da seguinte maneira (Masters, 1975; Froessling, 1938):

$$\frac{d_m}{d_t} = W = k_g A (P_{wb} - P_0) = k_g A (H_w - H_g) \quad (52)$$

$$\text{agora, } k_g = \frac{2D}{d_d} \quad \text{e, } A = \pi d_d^2$$

assim:

$$W = 2 \pi D d_d (P_{wb} - P_0) \quad (53)$$

Também, $q = -\lambda w$ (onde λ é o calor latente de evaporação da gota), da equação 51:

$$W = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_d \cdot k \cdot \Delta T}{\lambda} \quad (54)$$

$$W = \frac{2 \cdot p \cdot d_d \cdot (T_g - T_s)}{l} \quad (55)$$

onde T_s é a temperatura da superfície da gota. No caso da água, $T_s = T_{wb}$.

Pode então ser concluído das equações 54 e 55 que:

a) a taxa de evaporação é proporcional ao diâmetro da gota e não a área disponível.

b) a taxa absoluta de evaporação da grande gota esférica é maior do que a da gota.

e, da equação 54, substituindo

$$m = \frac{p \cdot d_d^3}{6} \cdot r_l$$

é obtida uma equação que descreve a mudança na área externa da gota em função do tempo na corrente de gás constante, da seguinte maneira:

$$\frac{d(d_d^2)}{dt} = \frac{8k\Delta T}{r_l \cdot l} \quad (56)$$

e, similarmente, em termos da força propulsora da transferência de massa:

$$\frac{d(d_d^2)}{dt} = 8D r_l \frac{P_{wb} - P_0}{P'} \quad (57)$$

onde P_{wb} é a pressão do vapor na temperatura de superfície da gota; P_0 é a pressão parcial de vapor do ar ao redor da gota, e P' é a pressão de vapor do componente gasoso não difuso que envolve a gota; isto é, a taxa de variação da área é constante durante o processo de evaporação de um líquido puro quando $(U_d - U_f) = 0$.

Considerando novamente a equação 54, o tempo necessário para secar completamente a gota pode ser descrito como (Marshall, 1954):

$$t = \frac{r_l \cdot l}{8 \cdot k \cdot \Delta T} (d_{d0}^2 - d_d^2)_{d_d \rightarrow 0} \quad (58)$$

isto é, o tempo de vida total da gota é proporcional ao diâmetro quadrado da gota original quando $(U_d - U_g) = 0$. As conclusões acima, da análise básica das equações de Froessling foram realizadas e consideradas verdadeiras por diversos pesquisadores da área. Ranz & Marshall (1952) verificaram experimentalmente uma abordagem assintótica de N_d tendendo ao valor 2, para um número de esferas líquidas diferentes e evaporando em uma corrente de gás constante.

2.3.1.2 EFEITOS DA VELOCIDADE RELATIVA

Quando existe um movimento relativo entre a gota e o gás de secagem, a taxa de evaporação aumenta devido ao rompimento da camada limite da gota em evaporação (figura 34). O rompimento e os distúrbios locais são causados por uma combinação de diferentes velocidades, separação de fluxo, turbulência local, etc. (Froessling, 1938). Estes efeitos produzem uma convecção forçada e desta forma aumentam a transferência de calor e de massa (Marshall, 1954; Johnstone, 1972; Williams, 1965). (figura 31)

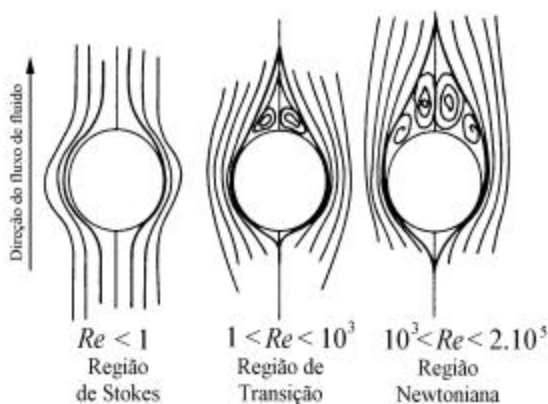


Figura 34 - Os padrões de fluxo obtidos quando uma gota esférica encontra-se em contato com um gás em *contracorrente*. A medida que o número de Reynolds (Re) da gota aumenta, inicia a separação do fluxo, causando a formação de uma camada não uniforme na divisa. Isto altera “ q ” e “ W ” apreciavelmente.

Os efeitos de acentuação foram correlacionados empiricamente (Ranz, 1952; Misra, 1972; Brauer, 1971; Eisenklam, 1967; Dickinson, 1968) pelas seguintes fórmulas funcionais:

$$Nu = 2 + k_1 \cdot Re^x \cdot Pr^y \quad (59)$$

e

$$Nu = 2 + k_1 \cdot Re^{x'} \cdot Pr^{y'} \quad (60)$$

Os melhores valores para os expoentes, obtidos por numerosos estudos experimentais são:

$$x = x' = 0,5$$

$$y = y' = 0,33$$

$$k_1 = k_2 = 0,6$$

Froessling obteve a seguinte equação, que descreve o processo de transferência de massa quando existe um movimento relativo entre as fases:

$$S_h = 2(1 + 0,276 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Sc}^{0,33}) \quad (61)$$

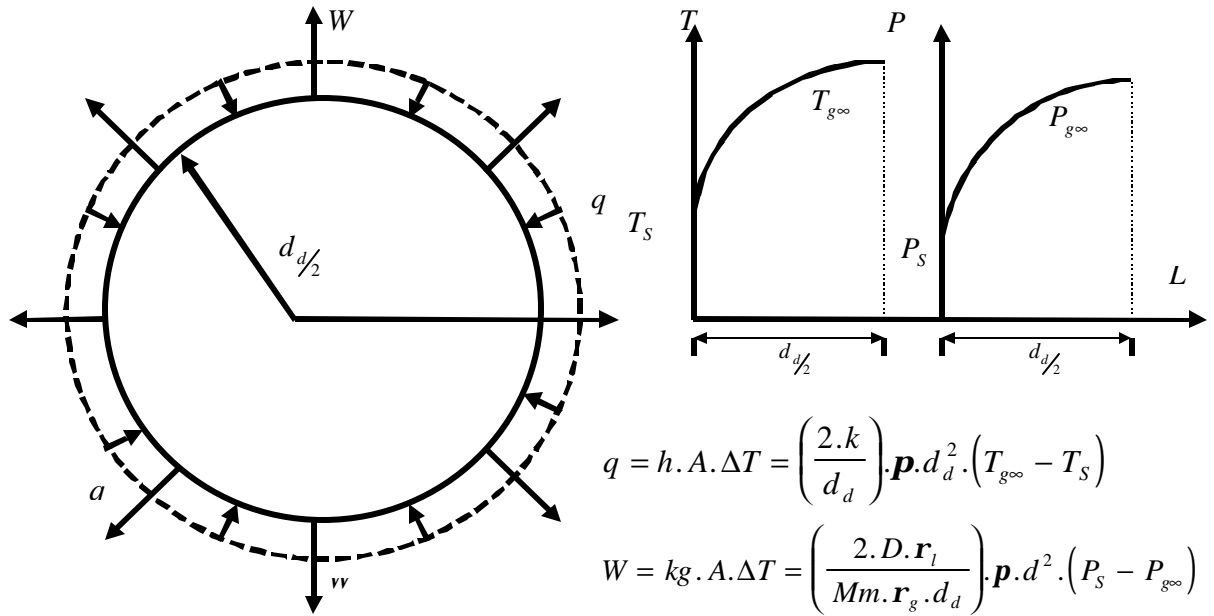


Figura 35- Transferência de calor e massa para e de uma gota em uma corrente de gás aquecido.

Também, Reay (1976) afirmou as seguintes relações:

$$\begin{aligned} N_U &= 2 & (\text{Re} < 1) \\ N_U &= 2 + 0,6 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33} & (1 < \text{Re} < 130) \\ N_U &= 2 + (0,5 \cdot \text{Re}^{0,5} + 0,0144 \cdot \text{Re}^{0,8}) \text{Pr}^{0,33} & (\text{Re} > 130) \end{aligned}$$

Outra expressão notável foi desenvolvida por Drake (1961) e comentada por Soo (1967):

$$N_U = 2 + 0,458 \text{Re}^{0,55} \text{Pr}^{0,33} \quad (1 < \text{Re} < 70.000)$$

Sob condições forçadas de convecção, é possível estimar o tempo necessário para evaporar completamente uma gota até obter um sólido seco; a situação durante o período de desaceleração é mais complexa, em função das condições de contato que se alteram constantemente (Marshall, 1954).

A solução é obtida substituindo as equações 59 e 60 pelas equações 48 e 49 nas equações 50 e 53.

2.3.1.3 EFEITOS DOS SÓLIDOS DISSOLVIDOS

Na maioria das aplicações de secagem através de atomização, as gotas contêm uma fração de matéria sólida na forma de uma solução, de uma suspensão coloidal, de uma massa ou de uma pasta (Masters, 1975). A fração de sólidos varia de 1 a 60%. No caso destas gotas o processo de evaporação é idêntico ao que ocorre nas gotas de um líquido puro, descrito anteriormente, até que as condições de saturação se aproximam e o material sólido apenas inicia a sua formação como uma crosta (uma camada na superfície da gota). Este processo é idêntico ao de um período de secagem a taxa constante de um material particulado. A medida que a crosta se desenvolve, a resistência para a transferência de umidade da gota aumenta (embora o processo de transferência de calor não diminua); isto é comparado ao período de taxa em declínio. O mecanismo de controle da taxa é a difusão de um volume de líquido interno através de uma crescente camada de crosta, seguido pelo transporte convectivo de massa (Ranz, 1952; Misra, 1972; Dlouhy, 1960; Keey, 1976; Suzuki, 1974).

Quando quantidades apreciáveis de sólidos necessitam ser produzidas, é muito importante entender os processos de secagem que ocorrem, para que seja possível prever a forma do produto final para o material. O processo de atomização e as características físicas da fase sólida são mais importantes neste sentido (Charlesworth, 1960).

A possível forma do produto geralmente surge das seguintes situações; durante o período inicial de secagem o líquido é evaporado pela taxa descrita pela equação (62).

$$W = \frac{2pk d_d (\Delta T)}{l} \quad (62)$$

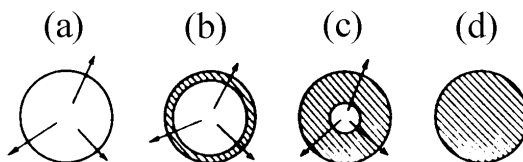


Figura 36- A estrutura da partícula associada a uma taxa baixa de transferência de calor: (a) a gota com uma taxa baixa de transferência de calor; (b) formação da crosta porosa quando atinge o conteúdo crítico de umidade, e o vapor pode difundir-se prontamente através desta; (c) difusão contínua do vapor através da casca porosa; (d) forma final do produto, uma partícula porosa com pouca ou nenhuma poeira.

A medida que uma quantidade maior de solvente evapora, o conteúdo de umidade

crítica é alcançado na sua superfície, saturando-a e, em função disto o processo de solidificação é iniciado. Desenvolvendo uma crosta sólida na superfície da gota. " W " diminui rapidamente a medida que a crosta sólida aumenta na espessura, causando mais uma resistência a transferência de massa (Marshall, 1954; Ranz, 1952). A taxa de transferência de calor mantém-se constante. Dentro da crosta, a pressão de vapor do líquido aumenta e a temperatura da gota aumenta. Quando as condições de saturação na superfície da gota são alcançadas, causando a solidificação, isto continua desde que o processo de transferência de calor seja mantida, uma vez que o material sólido dentro do volume de líquido não consegue deslocar-se na direção do centro da gota com uma taxa suficientemente rápida que evite a continuação da saturação (Froessling, 1938). Isto é importante, pois permite que o tempo de secagem no período a taxa constante possa ser estimado, desde que existam dados físicos apropriados a respeito da solubilidade e difusividade do soluto (Dlouhy, 1960). A medida que a camada superficial aumenta a sua espessura, o processo se torna cada vez mais dominado pela natureza do material sólido, formando uma camada similar a uma casca que controla as taxas de transferência de calor e de massa. Os quais, por sua vez controlaram a forma final do produto para um determinado conjunto de propriedades físicas e materiais. Considerando os seguintes exemplos, os quais são típicos, dos muitos encontrados na secagem por atomização (Masters, 1975).

Se a taxa de transferência de calor é relativamente baixa e o sólido é frágil e poroso por natureza então a medida que cresce a camada sólida externa, um volume de vapor do líquido interno pode difundir para fora da gota. Se as taxas de transferência de calor e de massa são aproximadamente iguais, então não existirá nenhuma pressão excessiva acumulada no interior da gota e esta continuará o processo de secagem até que seja obtida uma partícula compactada e porosa. Isto pode ser resumido pelo esquema mostrado na figura 36. Para que o processo demonstrado nesta figura progrida da fase (a) até a fase (d) é necessário um longo tempo de residência, resultando em uma câmara de secagem proibitivamente alta. Também, as taxas necessárias de transferências relativamente baixas, podem ser obtidas somente se as diferenças de temperatura forem pequenas; isto é freqüentemente inaceitável nas situações práticas.

Um exemplo mais típico ocorre quando existe uma taxa de transferência de calor relativamente alta. A característica chave do material sólido não é somente a sua porosidade, mas também sua plasticidade. Quanto mais plástico for o material, maior a sua capacidade de absorver o excesso causado pelas pressões acumuladas no interior da gota.

Se a superfície externa inicial for plástica, esta expande a medida que a pressão de

vapor aumenta em uma taxa determinada pelo processo de transferência de calor e pela porosidade da superfície. Esta superfície aumentará de espessura até atingir um determinado ponto, onde não mais crescerá. As pressões internas aumentam e, na região onde a superfície externa atingir o limite de plasticidade do material ocorrerá um fenômeno, similar a um sopro, que formará um buraco na superfície, permitindo desta forma a saída do vapor e do líquido retido no seu interior. A partícula resultante é chamada de *zeno-esfera*. E isto pode ser representado tipicamente pelo esquema da figura 37.

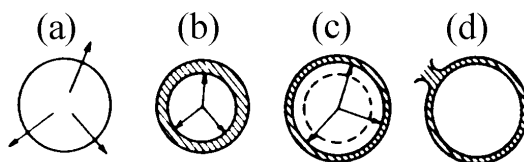


Figura 37 - A estrutura da partícula associada a uma alta taxa de transferência de calor: (a) a gota com alta taxa de transferência de calor; (b) o vapor não pode difundir para a superfície com uma taxa suficientemente alta, e a pressão de vapor aumenta constantemente; (c) o material, por ser plástico permite uma grande expansão. Eventualmente, os balances externos da pressão de vapor atingem os valores permitidos de expansão, causando um excesso de pressão no interior da superfície; (d) a partícula rompe em um determinado ponto. A forma resultante tem um núcleo vazio, e portanto uma densidade de massa relativamente baixa.

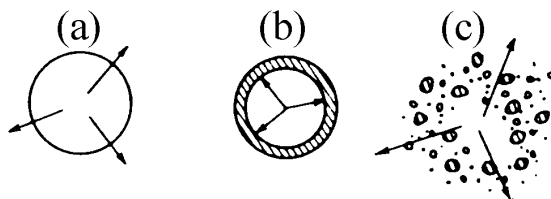


Figura 38 - O efeito da alta taxa de transferência de calor em um material com baixa plasticidade: (a) Alta taxa de transferência de calor para a superfície da gota; (b) a pressão de vapor rapidamente aumenta dentro da gota, a medida que a superfície aumenta de espessura. Pouca ou nenhuma difusão de vapor ocorre pela camada superficial, que também não se expande; (c) a camada superficial rompe instantaneamente pelo aumento da pressão de vapor, causando a formação de fragmentos e poeira.

Finalmente, um problema que ocorre freqüentemente em secadores por atomização é a grande quantidade de poeira formada. Em certas circunstâncias, esta poeira pode ser uma fração substancial do produto, causando problemas posteriores no transporte, manuseio e separação gás-sólido.

A poeira pode ser formada pela explosão da gota no processo de secagem por atomização (Reay, 1977). Isto ocorre quando para uma alta taxa de transferência de calor, grandes pressões de vapor são acumuladas no interior da gota em evaporação, uma vez que as taxas de transferência de massa são muito baixas ou praticamente zero, através de um material sólido de baixa porosidade e baixa plasticidade. Neste caso a pressão de vapor aumenta rapidamente e a camada externa não terá as características plásticas necessárias para amenizar o excesso de pressão estabelecido. Mas quando rompe, produz uma nuvem de

partículas fragmentadas e uma poeira fina. Este processo está ilustrado na figura 38.

2.3.2 PRODUÇÃO E SUBSEQÜENTE MOVIMENTO

DAS GOTAS PARA A CORRENTE DE GÁS

A secagem por atomização é essencialmente caracterizada pela distribuição do tamanho de gotas e pela forma sólida do produto. O processo de secagem é uma função da taxa de evaporação e do tempo de contato (Marshall, 1954; Coulson, 1968). O tempo de contato é uma função da trajetória de vôo e da velocidade instantânea. A trajetória de queda da gota depende principalmente das condições de fluxo do ambiente (Froessling, 1938). Em termos reais isto pode significar um fluxo não uniforme ao redor da gota em função da natureza complexa do padrão do fluxo de gás. Um esboço da hidrodinâmica da gota é feito na figura 39, pressupondo que as gotas são esféricas e estão em um fluxo uniforme de gás.

2.3.2.1 ATOMIZAÇÃO

Quando um líquido puro é atomizado em uma coleção de gotas quase esféricas, uma distribuição de tamanhos característicos é produzido em função das propriedades da alimentação líquida, das características do atomizador e das condições operacionais do processo (Marshall, 1954; Masters, 1975). Existem muitos estudos sobre o desempenho do atomizador em relação ao tamanho das gotas produzidas, tanto nos aspectos técnicos como práticos do processo de atomização (Dombrowski, 1968; Fraser, 1957; Mugele, 1960).

Em geral, as seguintes características são típicas das formas mais comuns de atomização. Os tipos básicos de atomizadores são (Marshall, 1954):

- i) atomizadores rotativos;
- ii) atomizadores de bicos por pressão;
- iii) atomizadores pneumáticos ou de dois fluidos.

Usando a atomização rotativa ou a de bicos por pressão, a maioria da massa das gotas produzidas ficam na faixa de $80\text{ }\mu\text{m} < d_g < 500\text{ }\mu\text{m}$. No caso da atomização pneumática são produzidas gotas menores, na faixa de $10\text{ }\mu\text{m} < d_g < 100\text{ }\mu\text{m}$. Muitos pesquisadores realizaram medidas do tamanho das gotas na maioria dos fluidos newtonianos (Fraser, 1957; Dombrowski, 1974; Nukiyama, 1938). Para líquidos não newtonianos e pastas, entretanto, poucos dados estão registrados na literatura existente (Ford, 1967). Este é um empecilho grave para a previsão das características operacionais dos secadores por atomização e reduz de

forma considerável a capacidade do projeto.

2.3.2.2 CÁLCULO DA TRAJETÓRIA DA GOTA

Em quase todos os casos onde as gotas são usadas para realizar um melhor contato entre o meio de secagem e a fase líquida dispersada, existem dois regimes distintos com relação ao movimento da gota (Marshall, 1954; Dombrowski, 1968; Coulson, 1968):

- 1) período de mudança rápida da velocidade de um valor inicial de U_0 para a velocidade terminal U_T .
- 2) período de velocidade constante ou quase constante de U_T , até a saída da gota da câmara de secagem.

Como foi afirmado anteriormente, a importância da história do tempo de deslocamento da gota é dupla, isto é:

- i. a secagem da gota depende da taxa de evaporação e do tempo total de contato;
- ii. o tempo total de contato é uma função da velocidade instantânea e do comprimento da trajetória da gota.

Uma estimativa apropriada das trajetórias das gotas exacerba a precisão das previsões de aumento de escala e também permite uma melhor estimativa das condições de secagem que afetam a cinética de secagem no período da taxa em queda. Até agora, foi possível realizar uma estimativa (1) e (2) realizando um equilíbrio de forças em torno de uma única gota fluando em uma corrente de gás, levando em consideração tanto os efeitos gravitacionais como os de centrifugação. O estudo mais abrangente neste campo foi realizado por Lapple e Shepherd (1940), e os detalhes deste estão resumidos abaixo para o caso de um fluxo unidimensional na presença de gravidade.

Considerando o movimento de uma gota viajando sobre a influência da gravidade. Estabelecendo um equilíbrio de forças para explicar a transferência do impulso entre as fases da gota e do gás, e podendo utilizar as seguintes equações para descrever a relação dos balanços de força nas direções horizontal e vertical (figura 39). O equilíbrio das forças rende:

$$M \frac{dU_h}{dt} = -F_D \cos \alpha \quad (63)$$

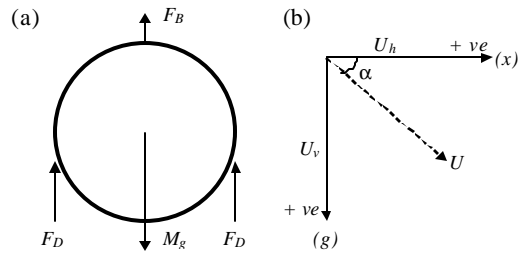


Figura 39 - (a) as forças atuando na gota esférica em um fluxo de gás em contracorrente; (b) os componentes da velocidade bidimensional para gotas em um campo gravitacional.

Onde, $(\cos \alpha = U_h / U)$ e $(\sin \alpha = U_v / U)$ são os componentes direcionais da velocidade e $(\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1)$, então:

$$M \frac{dU_v}{dt} = M_g \left(\frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_g}{r_s} \right) - F_D \sin \alpha \quad (64)$$

$$U_h^2 + U_v^2 = U^2 \quad (65)$$

por definição:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_g C_D U^2 A \quad (66)$$

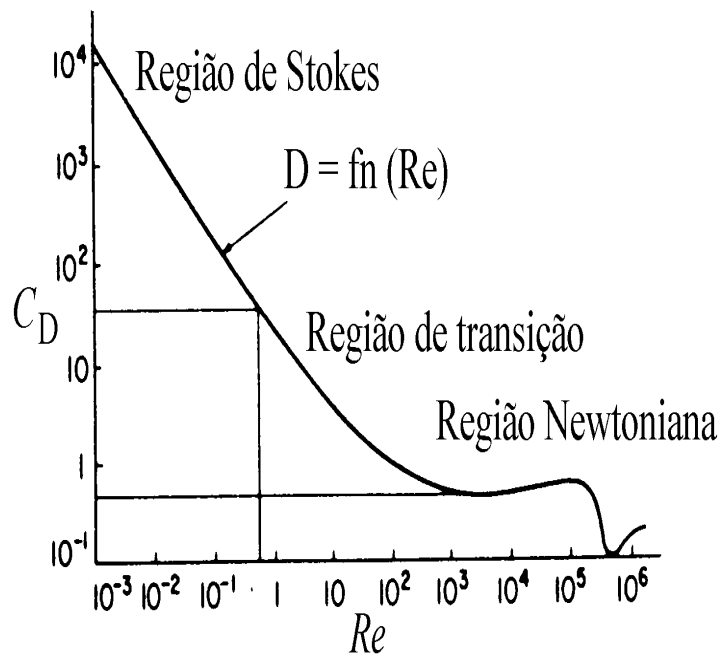


Figura 40 - Coeficiente de arraste - correlação com o número de Reynolds.

da figura 40:

$$C_D = f_n(Re)$$

(67)

substituindo a equação 66 na equação 64, obtêm-se:

$$\frac{dU_v}{dt} = g \left(\frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_g}{r_s} \right) - \left(\frac{\mathbf{r}_g \cdot A \cdot C_D \cdot U \cdot U_v}{2M} \right)$$

(68)

considerando o caso onde as gotas se movimentam na direção vertical. Como, $U = U_v$ e assim:

$$\frac{dU}{dt} = g \left(1 - \frac{r_g}{r_s} \right) - \left(\frac{\mathbf{r}_g \cdot A \cdot C_D \cdot U^2}{2M} \right)$$

(69)

agora:

$$U = \frac{Re \cdot m}{d_d \cdot r_g}$$

(70)

e:

$$dU = \frac{m}{d_d \cdot r_g} \cdot dRe$$

(71)

substituindo-se na equação 68 obtêm-se:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{m}{d_d \cdot r_g} \cdot \frac{dRe}{dt} = g \left(1 - \frac{r_g}{r_s} \right) - \left(\frac{\mathbf{r}_g \cdot C_D \cdot A \cdot U^2}{2M} \right)$$

(72)

ou:

$$\frac{2M \cdot d_d}{m \cdot A} \cdot \frac{dRe}{dt} = \frac{2M \cdot g \cdot d_d^2 \cdot r_g (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_g)}{m^2 \cdot A \cdot r_s} - C_D \cdot Re(Re)$$

(73)

deste:

$$f = \frac{2M \cdot g \cdot d_d^2 \cdot r_g (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_g)}{m^2 \cdot A \cdot r_s}$$

(74)

integrando-se entre os limites para t ($0 \rightarrow t$) e Re ($Re_0 \rightarrow Re_t$) obtêm-se:



e esta integração resulta em:

$$t = \frac{2M d_d}{k m A} \ln \left[\frac{f - k Re_o}{f - k Re_i} \right]$$

(75)

considerando a linha de fluxo, isto é , $C_D Re = k = 24$. Assim, para esferas no regime de fluxo de Stokes:

$$t = \frac{\mathbf{r}_s \cdot d_d^2}{18m} \ln \left[\frac{U_T - U_o}{U_T - U_i} \right] \quad (76)$$

onde U_T é dado por:

$$U_T = g \frac{(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_g) d_d^2}{18m} \quad (77)$$

A equação 76 descreve como, fornecendo uma velocidade inicial U_o e uma velocidade desejada de U_b , o tempo necessário para atingir esta velocidade é obtido diretamente pela substituição dos dados das propriedades físicas do gás e da gota.

Expressões semelhantes podem ser obtidas para o regime de fluxo turbulento, onde C_D é constante (aproximadamente 0,44). Na região de transição ou intermediária, as expressões analíticas não podem ser prontamente resolvidas e a integração gráfica é utilizada para fornecer informações do tempo de deslocamento e da velocidade instantânea. O procedimento básico, porém, é idêntico ao demonstrado anteriormente e seguindo as considerações de Lapple & Shepherd (1940).

Pela integração da expressão da velocidade obtida pela equação 75 e equação 76 em relação ao tempo, a distância total percorrida pode ser calculada, como esta exposto na continuação:

$$S = \int_0^t U_t \cdot dt \quad (78)$$

da equação 76, obtêm-se:

$$\frac{\mathbf{r}_s \cdot d_d^2}{18m} = t \quad (79)$$

como:

$$t = \tau \cdot \ln \left[\frac{U_T - U_0}{U_T - U_t} \right] \quad (80)$$

$$e^{t/\tau} = \frac{U_T - U_0}{U_T - U_t}$$

$$U_t = U_T - (U_T - U_0) \cdot e^{-t/\tau}$$

(81)

da equação 78:

$$S = \int_0^t [U_T - (U_T - U_0) e^{-t'/\tau}] dt$$

(82)

$$S = \int_0^t U_T dt - \int_0^t (U_T - U_0) e^{-t'/\tau} dt$$

(83)

$$S = U_T \cdot t - (U_T - U_0) (1 - e^{-t/\tau})$$

(84)

2.3.3 MODELAGEM DA SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO:

ABORDAGENS ESBOÇADAS NA LITERATURA

No passado, os modelos foram desenvolvidos para o processo de secagem por vários métodos diferentes. Estes métodos incluem:

- i) abordagens empíricas (Luikov, 1955; Turba, 1964; Feder, 1959);
- ii) abordagens analíticas (Sjenitzer, 1962; Sjenitzer, 1952; Johnstone, 1950; Miesse, 1954; Schlunder, 1962; Gluckert, 1962; Probert, 1946; Shapiro, 1957; Marone, 1971; Yaron, 1971);
- iii) métodos numéricos (Gauvin, 1975; Gauvin, 1976; Marshall, 1955; Dickinson, 1968; Dlouhy, 1960; Charlesworth, 1960; McIlvried, 1973; Leonchik, 1964; Viehweg, 1974; Janda, 1977).

Têm sido levantadas críticas em relação as abordagens (i) e (ii) no sentido de que são irrealistas ou extremamente simplificadas, o caso (i) exige demasiadas pressuposições simplificadoras, devido ao número de parâmetros que interagem, e o caso (ii) trata principalmente das relações das gotas individuais, embora existam exceções notáveis (Probert, 1946; Shapiro, 1957).

O aumento no uso de computadores resultou na predominância dos métodos

numéricos, e seu uso na secagem por atomização tem se tomado norma nos anos recentes (Gauvin, 1969; Gauvin, 1975; Gauvin, 1976; Marshall, 1955; Janda, 1977).

Para produzir em um secador do tipo "spray" uma forma de um produto desejado, é necessário entender quais as variáveis exercem a maior influência sobre o controle dos processos físicos essenciais que estão ocorrendo. Para obter uma capacidade de previsão é bastante útil modelar de uma forma realista as características essenciais do processo. Realizar isto por meios puramente analíticos tem demonstrado ser uma tarefa bastante complexa para a natureza dos mecanismos físicos básicos que interagem durante o processo. E estes mecanismos devem ser descritos de uma forma matemática conveniente, o que raramente é possível sem um grande número de pressuposições simplificadoras. As duas considerações chaves descritas acima, são:

- (a) o efeito da transferência simultânea de calor, de massa e de impulso na taxa de evaporação quando uma distribuição de gotas é contatada com uma corrente de gás de secagem;
- (b) o efeito da mudança do tamanho e da trajetória da gota no processo de secagem.

Pressupondo que a distribuição inicial dos tamanhos das gotas e a direção do movimento possam ser obtidas, a abordagem geralmente adotada nos estudos mais recentes nesta área é a de resolver um conjunto de equações diferenciais que descrevem o processo de transferência de calor, de massa e de impulso através de métodos numéricos (Gauvin, 1969; Gauvin, 1975; Gauvin, 1976; Keey, 1976; Janda, 1977; Keey, 1977).

A abordagem pode ser amplamente resumida. A partir da consideração de um padrão de fluxo produzido no secador "spray", as forças atuando nas gotas individuais podem ser obtidas. Conseqüentemente o movimento das gotas em termos de velocidade, desaceleração e da direção podem ser previstos em relação as forças que atuam sobre elas. O obstáculo principal a esta abordagem, o qual é essencialmente o de Lapple & Shepherd (1940), esta na consideração dos dois pontos seguintes.

- i) O coeficiente do efeito de arrastamento quando a gota passa pela evaporação é muito diferente do previsto pela curva padrão $C_D - Re$ (Ingebo, 1951; Spalding, 1959; Eisenklam, 1967; Law, 1977). Isto é, devido as flutuações locais na camada limite, causada pelo vapor que se movimenta através dela e por um rompimento geral nas características da superfície.
- ii) A curva padrão de arrastamento é para esferas simples, sem influência exercida por qualquer corpo. Isto não é realista, pois as nuvens de gotas exercerão um efeito considerável sobre a magnitude de C_D (Spalding, 1959; Natarajan, 1973).

Se as informações acima, com relação a trajetória são viáveis, os efeitos de transferência simultânea de calor e de massa podem ser quantificados à incrementos de tempos ou de distância dentro da câmara de reação e assim através de um cálculo passo-a-passo (Dlouhy, 1960), podem ser prognosticados a taxa de evaporação e o tamanho mutante da gota.

É necessário também calcular, a cada etapa, a temperatura local e a umidade do gás de secagem, como são estas propriedades da corrente de gás, as quais determinam a taxa de evaporação posterior, na próxima umidade incremental. Também, à medida que ocorre a evaporação, as propriedades psicrométricas do gás em si mesmas se tomam diretamente dependentes da taxa de evaporação (Gauvin, 1969; Gauvin, 1975; Gauvin, 1976).

Este tipo de abordagem foi adotado por numerosos pesquisadores e o método de resolução é o tipicamente discutido por Marshall (1955). Keey & Pham (1976) detalharam os métodos que foram desenvolvidos para o projeto numérico dos secadores "spray", e também descrevem detalhadamente seus próprios recentes estudos, nos quais os métodos apresentados acima foram empregados com numerosas expressões diferentes, que descrevem a distribuição característica dos tamanhos das gotas.

Outros métodos numéricos foram desenvolvidos por Janda (1977), Gauvin & Katta (1975, 1967) e por Gauvin & Baltas (1969).

Além da incerteza de utilizar o coeficiente padrão de arrastamento no caso de uma nuvem de gotas em evaporação, outro problema essencialmente sem solução é a previsão de situações reais do conteúdo crítico de umidade (McIlvried, 1973).

Contudo, as melhores técnicas numéricas são bastante sofisticadas e podem prognosticar razoavelmente bem os efeitos que os parâmetros operacionais do secador "spray" terão no processo, especialmente quando forem fornecidas informações suficientes provenientes de unidades de planta piloto.

Assim, os métodos de projeto e as previsões sobre o desempenho do secador "spray" têm mudado de uma base semi-empírica para uma base razoavelmente analítica numérica. Previsões através do aumento de escala não são totalmente confiáveis, até agora, devido à falta de informações disponíveis sobre a dinâmica das nuvens de gotas numa corrente de gás no momento da evaporação, e a natureza complexa dos padrões do fluxo de gás gerados em secadores "spray" de maior tamanho.

O uso dos dados da curva padrão de arrastamento (C_D - Re) na estimativa das trajetórias das gotas em evaporação não considera as perturbações locais que afetam a

camada limite da gota. Estas são causadas pela densidade da população das gotas, pela intensidade da turbulência local e pela distorção no formato da gota. Em alguns casos é provável que o coeficiente de arrastamento possa ser aumentado por um fator de 2 ou maior.

Finalmente, no passado, os modelos que descreveram os processos de secagem total por atomização foram irrealistas ou demasiadamente simplificados. Muitos avanços ocorreram nos últimos 10 anos em relação aos processos básicos de transporte que realizam, e desde que informações suficientes sobre as instalações da fábrica estão disponíveis, os modelos empíricos agora fornecerão uma aproximação razoável do desempenho dos secadores em escala (tamanho) total, com as condições dadas acima.

Mas, como a ação sobre o controle operacional de um sistema de secagem por atomização é considerado complexo, onde os operadores responsáveis por estes controles devem tomar decisões quando realizam os ajustes necessários para o bom funcionamento de todo o processo. Essas decisões são tomadas, normalmente, levando em consideração medidas qualitativas baseadas em variáveis medidas quantitativamente no ambiente de produção.

O analista de conhecimento freqüentemente se expressa através de termos difusos ao invés de termos numéricos, embora as variáveis sejam medidas quantitativamente. Regras difusas podem também ser utilizadas para descrever aspectos qualitativos. Tais regras podem ser implementadas usando a Teoria dos Conjuntos Difusos desenvolvida por Zadeh (1965).

2.4 A LÓGICA DIFUSA NO CONTROLE DE EQUIPAMENTOS

A maior parte do raciocínio humano é mais aproximado do que preciso. De um modo bastante eficiente os humanos são capazes de tomar decisões racionais com informações imprecisas ou incompletas, reconhecer vozes e imagens distorcidas, resumir e completar dados parcialmente conhecidos, etc.

Desta perspectiva a Lógica Difusa, pode ser definida como uma intenção de construir um modelo de raciocínio humano, refletindo o seu caráter aproximado, qualitativo. Neste modelo, o raciocínio preciso deve ser visto como um caso limite que estará incluído no anterior. A grande utilidade da Lógica Difusa, (que sustenta seu êxito atual) está na possibilidade de tratar problemas demasiadamente complexos ou mal definidos. Por este motivo, leves avanços e contribuições na representação do conhecimento impreciso, semântica da linguagem natural e inferências a partir de dados imprecisos aparecem misturados entre si e em muitos casos têm sido motivados por problemas práticos para resolver, o que dificulta a

definição dos limites específicos do desenvolvimento em cada uma destas parcelas.

Não obstante, o anteriormente exposto e por sistematizar a apresentação, dividiremos esta em dois grandes blocos. Na primeira são comentados os marcos do desenvolvimento da Lógica Difusa e o Raciocínio Aproximado, e na segunda estão sintetizadas a evolução de suas aplicações mais notáveis.

Na história da Lógica Difusa deve ser destacada a ausência de controvérsia interna que, não obstante, foi acompanhada por uma forte oposição externa. O desenvolvimento da Lógica Difusa foi inspirado e guiado pelos trabalhos de Lotfi A. Zadeh, professor de Engenharia Eletrônica no Departamento de mesmo nome da Universidade Berkeley na Califórnia.

2.4.1 A LÓGICA DIFUSA E O RACIOCÍNIO APROXIMADO

A noção de Conjunto Difuso (Fuzzy Set), aparece pela primeira vez em 1964, em um memorando da Universidade Berkeley na Califórnia e é de autoria, como foi comentado, de L.A. Zadeh. Este memorando foi publicado, um ano mais tarde na revista *"Information and Control"*, marcando o nascimento de uma nova Teoria (ou Tecnologia) conhecida genericamente como *"Teoria de Subconjuntos Difusos"*.

Falando coloquialmente é possível comentar que a noção de subconjunto difuso é introduzida como um modelo para descrever aquelas propriedades em que a transição do "ser" ao "não ser", do "se cumpre" ao "não se cumpre", do "dentro" ao "fora", é gradual e não brusca. Deste modo a Teoria de Subconjuntos Difusos aparece associada a uma lógica infinitamente valorada do mesmo modo que a Teoria Clássica dos Conjuntos se baseia na Lógica bivalorada de Boole.

O surgimento do artigo antes mencionado dá lugar a um conjunto de investigações onde pesquisadores de diferentes nacionalidades e de diferentes campos da Matemática, Engenharia e Informática iniciam a investigação da nova disciplina. Ainda que não seja abordado este tópico, deve ser assinalado que foram investigadas versões difusas de múltiplos modelos clássicos, ressaltando que algumas delas (sobretudo as desenvolvidas nos primeiros tempos) só resultaram em meros jogos construtivos sem fundamento teórico ou inspiração prática.

Desde o princípio foi observado que, por sua própria natureza, esta nova ferramenta seria de grande utilidade para descrever os conceitos vagos e imprecisos que nascem no raciocínio humano (como é apontado por Zadeh (1965) "...onde a fonte da

imprecisão e mais a falta de fronteiras bem definidas entre conceitos que a presença de variáveis aleatórias"). Por outro lado também se imaginava que os subconjuntos difusos seriam a ferramenta que permitiria descrever e resolver problemas de planejamento mal definido e que, por tanto, não teriam solução dentro das Teorias Clássicas. Neste sentido devem ser citados os trabalhos de Goguen (1969), um dos investigadores mais seriedade dos primeiros tempos, que neste trabalho analisa a possibilidade de obter uma lógica dos conceitos inexatos, paralela ou complementar a lógica clássica (dos conceitos exatos).

Como resposta às necessidades delineadas pelo desenvolvimento da Inteligência Artificial e mais concretamente pela necessidade de dispor de ferramentas mais potentes para a construção de Sistemas Inteligentes, em sucessivos trabalhos desde 1971, Zadeh introduz a idéia de *Raciocínio Aproximado* e os elementos formais que acabariam compondo o corpo da doutrina da Lógica Difusa e suas aplicações tal como é conhecido na atualidade.

Em "*Quantitative Fuzzy Semantics*", Zadeh (1971) discute o emprego dos subconjuntos difusos para manejar quantitativamente conceitos basicamente qualitativos, dotando de semântica as proposições tais como "*João é jovem*" ou "*o edifício é alto*" ou os "*ganhos são reduzidos*". Continuação natural deste trabalho é "*A Fuzzy Set Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges*" (Zadeh, 1972), onde são tratados o que a partir de então passam a ser conhecidos genericamente como modificadores lingüísticos (*muito, algo, regular, a maior parte, poucos, ...*) que são empregados na linguagem natural para modificar os termos qualificativos. O tema, básico para a representação e manuseio do conhecimento impreciso, foi estudado por diversos autores, cujo desenvolvimento, junto com seu tratamento computacional estão sintetizados por Zadeh (1985) no artigo "*Syllogistic Reasoning in Fuzzy Logic and its Applications to Usuality and Reasoning with Dispositions*".

Um ponto chave no desenvolvimento da Lógica Difusa e suas aplicações é o trabalho no qual Zadeh (1973) estabelece o que se denomina *Princípio de Incompatibilidade*, segundo o qual, precisão e complexidade são propriedades incompatíveis na hora de descrever a conduta de um determinado sistema (entendendo sistema de um modo absolutamente geral). Princípio que justificaria a pouca efetividade dos computadores e os programas convencionais para modelar o comportamento e raciocínio humanos. Para evitar estes problemas Zadeh estabelece a necessidade de desenvolver ferramentas capazes de manusear de modo rigoroso uma informação imprecisa, o que por sua vez ajuda duas grandes tarefas:

1) *Representação da informação imprecisa.* Como ferramenta genérica propõe empregar a Teoria de Subconjuntos Difusos, e mais concretamente alguns resultados de trabalhos anteriores. Adicionalmente propõe descrever as relações de entrada-saída de sistemas complexos mediante proposições condicionais do tipo SE-ENTÃO, ligando as variáveis de entrada com as variáveis de saída mediante sentenças próximas às da linguagem natural empregadas habitualmente pelos especialistas.

2) *Inferência sobre informação imprecisa.* Por extensão da regra de dedução básica do Cálculo de Predicados, Zadeh havia estabelecido previamente a necessidade de dispor de um *modus ponens* generalizado, um esquema de inferência capaz de combinar feitos e conhecimentos imprecisos para dar lugar a novos feitos (imprecisos). O problema obviamente, consiste em caracterizar de um modo rigoroso estes feitos deduzidos. Para isto introduz o que desde então se conhece como Regra Composicional de Inferência.

A Regra Composicional de Inferência (como método básico de raciocínio difuso) têm recebido uma considerável atenção, especialmente desde que Mamdani (1974) e Mamdani & Asilian (1975) demonstraram a aplicabilidade da Lógica Difusa no campo do controle. Deve ser mencionado que a partir deste momento ocorre uma mudança substancial no enfoque dos trabalhos dedicados à Lógica Difusa. Se até este momento prestou-se uma grande atenção aos fundamentos formais, agora começa a ser objetivo prioritário que as idéias possam transformar-se em sistemas de raciocínio automatizado implementados mediante computador.

A seleção da função de implicação que deve ser empregada na Regra Composicional é um problema básico para o projeto de sistemas de inferência difusos, com amplas repercussões nas aplicações, por ser equivalente à modernização de um esquema de raciocínio, que foi amplamente tratado na literatura. Trillas & Valverde (1984 e 1985) em duas oportunidades demonstraram a caracterização e obtenção de funções de implicação. A efetividade das diferentes funções de implicação para reproduzir o raciocínio humano e proporcionar métodos de inferência adequados sobre algum critério (teórico ou prático), foi exaustivamente estudada por autores como Mizumoto (1982, 1985 e 1988), Kiska (1985), Smets (1987), Cao (1990), etc.

Em 1975, Zadeh publica uma trilogia de artigos no campo da representação de conhecimentos imprecisos, onde completa algumas idéias anteriores, desenvolvendo o conceito da variável lingüística e suas propriedades como ferramenta para modelar a informação imprecisa, incompleta ou não totalmente confiável. E nestes trabalhos daria a forma definitiva à Regra Composicional de Inferência.

O primeiro artigo que aparece no primeiro número da revista "International Journal

of Fuzzy Sets and Systems" em 1978, é de Zadeh e têm por título "Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility". Uma tese básica estabelecida neste trabalho é que se estamos interessados no significado da informação mais que no seu conteúdo, então a estrutura é mais possibilística que probabilística. Deste modo uma variável difusa (relativa ao significado) está associada a uma medida de possibilidade, do mesmo modo que uma variável aleatória (relativa ao conteúdo) está associada a uma distribuição de probabilidade e portanto, uma mesma noção pode estar associada simultaneamente a um conteúdo de possibilidade e outro de probabilidade.

Para compreender o papel da *Teoria da Possibilidade* na Lógica Difusa deve ser levado em conta que esta trata com proposições vagas no seu significado. Podendo existir incerteza no que se refere ao seu cumprimento, de tal maneira que sempre existem distribuições de possibilidade sobre os universos de discurso associados às variáveis que apareçam nas proposições envolvidas. Mas não é obrigatório que elas existam sobre a variável "valor de verdade" que poderá tomar valores 0 ou 1, dependendo das proposições serem consideradas verdadeiras ou falsas. Dubois & Prade (1985), entre outros, desenvolveram a denominada Lógica Possibilística que trata com proposições não vagas, mas sobre cujo cumprimento existe algum tipo de incerteza não aleatória. Neste caso para cada proposição existe uma certeza sobre o valor das variáveis envolvidas, mas existe uma distribuição de possibilidade sobre seu "valor de verdade". Ainda que relacionadas, a Lógica Difusa e a possibilística são diferentes e não devem ser confundidas.

Em uma linha de síntese deve ser citados os trabalhos, "*Fuzzy Logic and Approximate Reasoning*" e "*A Theory of Approximate Reasoning*" de Zadeh, L.A.(1979), onde se descreve uma bem elaborada teoria do Raciocínio Aproximado reunindo resultados de trabalhos anteriores sobre variáveis difusas, Lógica Difusa e distribuições de possibilidade como ferramentas para modelar o processo de obter conclusões imprecisas a partir de premissas imprecisas. Posteriormente, e continuando com as aplicações da Lógica Difusa no Raciocínio Aproximado, devem ser citados os trabalhos "A Theory of Commonsense Knowledge"(1984) e "Syllogistic Reasoning in Fuzzy Logic and its Applications to Usuality and Reasoning with Dispositions"(1985), publicados por Zadeh, L.A. Neles é analisado o "conhecimento de sentido comum" (aquele em que existe informação subentendida) e os mecanismos de inferência sobre este tipo de conhecimento.

O Princípio de Resolução descoberto por Robinson, J.A. em 1965, é uma regra de inferência da Lógica Clássica que permite a dedução de teoremas a partir de axiomas de um modo puramente mecânico. Por este motivo o Princípio de Resolução têm sido uma ferramenta

chave na história da Inteligência Artificial empregada para o projeto e implementação no computador de "*demonstração automática de teoremas*".

Desde o início da década dos oitenta, M. Mukaidono e seu grupo na Faculdade de engenharia da Universidade de MEIJI (Japão), têm estudado a extensão do Princípio da Resolução para a Lógica Difusa, tendo como objetivo final o desenvolvimento de um *Prolog-Difuso* e a implementação "hardware" em uma *Máquina-Prolog-Difusa*, constituindo estas investigações parte do projeto de Quinta Geração de Computadores (patrocinado pelo Ministry of International Trade and Industry do Japão). Mukaidono (1982) e Mukaidono & Masuzawa (1983) apresentam os resultados básicos da extensão da regra inferência de Robinson sobre hipóteses não demasiadamente restritivas. Um estudo detalhado dos fundamentos da *Máquina-Prolog-Difusa* foi realizada por Shen (1988).

Tendo como base o trabalho de Robinson, mas empregando um ponto de vista diferente ao de Mukaidono, J.F. Baldwin e seu grupo trabalharam para construir linguagens de programação que permitam a implementação automatizada do Raciocínio Aproximado mediante Lógica Difusa. O primeiro resultado foi a linguagem denominada FRIL (Fuzzy Relational Inference Language), relatada por Baldwin & Zhou (1984), que lhes serviria como base para construir um Prolog baseado em Lógica Difusa, que denominaram de *F-Prolog* (Martin, 1984). Um estudo desta linguagem e sua aplicação a construção da base de dados foi realizada por Martin (1988).

Para finalizar este breve repasse da evolução da Lógica Difusa é necessário citar o trabalho de Ruspini (1991), onde se apresenta a interpretação semântica da Lógica Difusa, completando assim de modo formal o que foi considerado por alguns como um desenvolvimento excessivamente pragmático da Lógica Difusa.

2.4.2 ALGUMAS APLICAÇÕES DA LÓGICA DIFUSA

Nos últimos anos a Lógica Difusa, como ferramenta de Raciocínio Aproximado, têm encontrado numerosas aplicações que vão desde do campo das finanças até a engenharia de terremotos. Todas elas correspondem a problemas muito complexos ou mal conhecidos, que por isto não admitem tratamento por métodos baseados na Lógica Clássica. De fato a introdução da Lógica Difusa têm permitido modelar e resolver situações tradicionalmente consideradas como intratáveis, e neste sentido constitui uma revolução em muitos campos.

Como foi comentado anteriormente, pode ser considerado que a Lógica Difusa surgiu como resposta à necessidade de dispor de modelos de inferência para tratar o conhecimento impreciso basicamente no contexto da construção de Sistemas Inteligentes.

Sem constrangimento pode ser dito que, atualmente sua maior, mais conhecida e notável aplicação é o controle de processos, um campo muito diferente daquele que impulsionou suas primeiras etapas. A seguir é realizado um breve comentário sobre o desenvolvimento histórico destas duas grandes áreas.

A aplicação da Lógica Difusa e da teoria da possibilidade no campo dos sistemas baseados em regras que se desenvolveram principalmente em duas direções. De um lado foi generalizado o modelo dos fatores de certeza (empregado pela primeira vez em MYCIN) para dar entrada à imprecisão não probabilística. Por outro lado foi estudado o manuseio de predicados imprecisos na descrição das regras ou na informação disponível sobre os fatos. Dentro da primeira linha foram investigados modelos de representação e propagação da incerteza e exemplos típicos de sistemas construídos com estas ferramentas são o sistema RUM, desenvolvido por Bonnisone (1987), ou o sistema de inferência MILORD, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em Inteligência Artificial do Centro de Estudos Avançados de BLANES (Gerona) citado por Godo (1988).

Dentro da segunda linha, os trabalhos foram basicamente encaminhados ao encontro de métodos de inferência mais potentes, interesse que foi reforçado pelas necessidades da aplicação ao Controle de Sistemas. Concretamente foi pesquisado a Regra Composicional de inferência e o emprego de distintas funções de implicação, como foi citado por: Mizumoto & Zimmermann (1982); Trillas & Valverde (1984); Trillas & Valverde (1985); Mizumoto (1985); Kiska (1985); Chang (1985) e Cao (1990).

Os Fundamentos do controle por meio da Lógica Difusa estão contidos em Zadeh (1972) e elaborados de um modo mais completo em Zadeh (1973). A idéia de base é que as relações de entrada-saída (regras de controle) de um sistema complexo podem ser descritas por especialistas na forma de sentenças condicionais *SE-ENTÃO com antecedente(s) e conseqüente(s)* dados na forma de proposições difusas. A partir desta descrição e da observação do comportamento do sistema, pode ser deduzida a *ação de controle* empregando as leis de inferência da Lógica Difusa.

Os pioneiros na implementação prática destas idéias foram Mamdani e Assilian, junto com sua equipe no Queen Mary College de Londres. Nos primeiros trabalhos, Mamdani (1974) e Mamdani & Assilian (1975), desenvolveram a regulação e um motor a vapor, aplicação a que seguiram muitas outras, se bem que deve ser destacado que na maior parte dos casos não passaram de exercícios de laboratório, com exceção feita por um controlador para plantas de fabricação de cimento que chegou a estar comercialmente disponível segundo Holmblad & Ostergaard (1982). Ainda assim, o aparecimento destes primeiros desenvolvimentos despertou um interesse inesperado na comunidade científica, já que

mostravam a possibilidade de controlar sistemas classicamente considerados como intratáveis por sua complexidade ou mal conhecimento, e depois da primeira época associada quase exclusivamente ao grupo do Queen Mary College, começa um período em que a maior parte de um número rapidamente crescente de investigações estiveram dedicadas a estudar e formalizar o conceito do "*controlador difuso*". Tong (1985) analisa detalhadamente a evolução e história do Controle Difuso até 1983. Como o autor assinala, até esta data os trabalhos possuem um marcante caráter teórico.

Desde 1985 foi observada uma mudança substancial na orientação das pesquisas que se dirigem basicamente à obtenção de produtos efetivamente comerciais. Os responsáveis desta mudança são os pesquisadores japoneses, que desde a segunda metade da década dos oitenta se colocaram na vanguarda destes desenvolvimentos. Aplicações dignas de menção são as de controle automático do funcionamento de um trem (desenvolvida por HITACHI), controle de um carro e um helicóptero mediante ordens verbais fornecidas em linguagem natural por um agente externo (realizado no "Laboratory for International Fuzzy Engineering Research", Yokohama, Japão, sobre a direção do Prof. M. Sugeno), o controlador universal (proposto por FUJI), o controle de estabilização de um sistema (desenvolvido por T. Yamakawa na Universidade de Kumamoto e no Instituto Tecnológico de Lizuka, Japão), etc. Grande número de referências sobre aplicações de controle desenvolvidas no Japão podem ser encontradas nos Pré-prints do IIº Congresso da Associação Internacional de Sistemas Difusos (1987); no IIZUKA'90 (1990); IFES'91 (1991) e por Yager & Zadeh (1992).

Na maior parte das aplicações atuais da Lógica Difusa, é empregado o software para a implementação dos algoritmos difusos e as regras de controle. Não obstante e a partir dos trabalhos pioneiros de Yamakawa (1986), e Togai et al. (1986), inicia o caminho das implementações em hardware. Nesta linha foram obtidos resultados importantes, devendo destacar o controlador de T. Yamakawa e o "chip" de Togai e Watanabe orientado para sistemas baseados em regras.

Na Espanha existe um significativo número de pesquisadores que desenvolvem seu trabalho no âmbito da Lógica Difusa e suas aplicações. Uma equipe interdisciplinar com membros procedentes de distintas universidades estão desenvolvendo o projeto denominado ORBE (**OR**denador **B**orroso **E**xperimental) pelo patrocínio do Ministério de Indústria e Energia, com o objetivo geral de desenvolver arquiteturas de computadores capazes de realizar de um modo eficiente o processamento de informação difusa. Nas primeiras etapas do projeto foram analisadas formas alternativas de "*modus ponens*" generalizado, buscando melhores contribuições nas implementações. Os resultados, alguns dos quais já foram comentados anteriormente podem ser encontrados em Delgado (1990); Moral (1990) e Vergegay (1992).

2.5 INTRODUÇÃO À TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS

Pessoas freqüentemente se expressam através de termos imprecisos ao invés de termos numéricos, embora as variáveis sejam medidas quantitativamente. Regras difusas podem também ser utilizadas para descrever aspectos qualitativos. Tais regras podem ser implementadas usando a Teoria dos Conjuntos Difusos desenvolvida por Zadeh (1965).

A Teoria dos Conjuntos Difusos fornece um instrumento adequado para modelar situações em que ocorram imprecisões e/ou incertezas.

2.5.1 CONCEITOS

A teoria clássica dos conjuntos caracteriza-se pelo fato de que um elemento pertence ou não pertence a um conjunto, não existindo uma situação intermediária. Os conjuntos clássicos apresentam limites bem definidos.

Considere-se que X seja um conjunto clássico de objetos, denominado universo, cujos elementos são denominados por x , e que A seja um subconjunto de X . Uma função f_A é definida por:

$$f_A(x) = 1 \text{ se e somente se } x \in A$$

$$f_A(x) = 0 \text{ se e somente se } x \notin A$$

f_A é a função característica de X em $\{0, 1\}$ sendo $\{0, 1\}$ chamado conjunto de avaliação.

No mundo real, entretanto, existe uma série de conjuntos que não apresentam limites bem definidos, ou seja, a pertinência de um elemento ao conjunto não pode ser especificada por um critério binário do tipo "sim ou não". Existem casos que se encontram em uma situação intermediária. Com base nisso, Zadeh (1965) desenvolveu a teoria dos conjuntos difusos. De acordo com esta teoria um conjunto não apresenta limites bem definidos, podendo um elemento pertencer parcialmente a ele, ou pertencer a dois conjuntos ao mesmo tempo. O que vai caracterizá-lo será o "grau de pertinência", que é uma medida que quantifica o grau ou a "força" com que este elemento pertence a um determinado conjunto.

Matematicamente, um conjunto difuso é definido como: Se X é uma coleção de objetos, então um conjunto difuso A em X é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, f_A(x)) \mid x \in X\} \quad (85)$$

A entidade $f_A(x)$ é chamada função de pertinência, ou seja, o valor que é grau de pertinência de x em A . $f_A(X)$ é uma função em $[0,1]$ (PAO, 1989).

2.5.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS

- a) O suporte de um conjunto difuso A , $S(A)$, é o conjunto de todo $x \in X$ tal que $f_A(x) > 0$.
- b) O conjunto de elementos que pertencem ao conjunto difuso A em pelo menos um grau de pertinência α é chamado o conjunto de nível α .

$$A_\alpha = \{x \in X \mid f_A(x) \geq \alpha\} \quad (86)$$

- c) Um conjunto difuso A é convexo se:

$$f_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(f_A(x_1), f_A(x_2)) \quad x_1, x_2 \in X$$

$$\lambda \in [0,1] \quad (87)$$

- d) Para um conjunto difuso finito A , a cardinalidade $[A]$ é definida como:

$$[A] = \sum f_A(x), \text{ onde } x \in X \quad (88)$$

- e) A função de pertinência $f_C(x)$ da interseção de $C = A \cap B$, é definida por:

$$f_C(x) = \min(f_A(x), f_B(x)), x \in X \quad (89)$$

- f) A função de pertinência $f_D(x)$ da união $D = A \cup B$, é definida por:

$$f_D(x) = \max(f_A(x), f_B(x)), x \in X \quad (90)$$

- g) A função de pertinência do complemento de um conjunto difuso A , $f_{CA}(x)$ é definida por:

$$f_{CA}(x) = 1 - f_A(x), x \in X \quad (91)$$

- h) Define-se o produto cartesiano de conjuntos difusos como segue: seja (A_1, \dots, A_n) conjuntos difusos em (X_1, \dots, X_n) . O produto cartesiano é o conjunto cartesiano no espaço produto $(X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n)$, com função de pertinência:

$$f_{(A_1 \times \dots \times A_n)}(x) = \min\{f_{A_i}(x_i) \mid x = x_1, \dots, x_n, x_i \in X_i\} \quad (92)$$

- i) A soma algébrica (soma probabilística), $C = A + B$ é definida como:

$$C = \{x, f_{A+B}(x) \mid x \in X\}, \quad \text{onde:}$$

$$f_{A+B}(x) = f_A(x) + f_B(x) - f_A(x) * f_B(x) \quad (93)$$

j) A soma limitada, $C = A \oplus B$ é definida como:

$$C = \{(x, f_{A \oplus B}(x)) \mid x \in X\}, \text{ onde:}$$

$$f_{A \oplus B} = \min(1, f_A(x) + f_B(x)) \quad (94)$$

k) A diferença limitada, $C = A - B$ é definida como:

$$C = \{(x, f_{A-B}(x)) \mid x \in X\}, \text{ onde:}$$

$$f_{A-B}(x) = \max(0, f_A(x) + f_B(x) - 1) \quad (95)$$

l) O produto algébrico de dois conjuntos difusos, $C = A * B$ é definido:

$$C = \{(x, f_A(x) * f_B(x)) \mid x \in X\} \quad (96)$$

m) Sejam $X, Y \subseteq R$ conjuntos universais, então:

$$R = \{(x, y), f_R(x, y)) \mid (x, y) \subseteq X.Y\} \quad (97)$$

é chamada uma relação difusa sobre $X.Y$.

n) Seja $X, Y \subseteq R$ e $A = \{(x, f_A(x)) \mid x \in X\}$, $B = \{(y, f_B(y)) \mid y \in Y\}$, dois conjuntos difusos.

Então, $R = \{(x, y), f_R(x, y)) \mid (x, y) \in X.Y\}$ é uma relação difusa sobre A e B se:

$$R(x, y) \leq A(x), (x, y) \in X.Y \text{ e}$$

$$R(x, y) \leq B(y), (x, y) \in X.Y. \quad (98)$$

o) Sejam R e Z duas relações difusas no mesmo espaço

$$f_{R \cup Z}(x, y) = \max \{f_R(x, y), f_Z(x, y)\}, (x, y) \in X.Y$$

$$f_{R \cap Z}(x, y) = \min \{f_R(x, y), f_Z(x, y)\}, (x, y) \in X.Y \quad (99)$$

p) Seja $R = \{(x, y), f_R(x, y) \mid (x, y) \in X.Y\}$ uma relação binária difusa. A primeira projeção de R é definida como:

$$R(1) = \{x, \max_y f_R(x, y) \mid (x, y) \in X.Y\} \quad (100)$$

A segunda projeção é definida como:

$$R(2) = \{(y, \max_x f_R(x, y) \mid (x, y) \in X.Y\} \quad (101)$$

A projeção total é definida:

$$R(T) = \max_x \max_y \{ f_R(x, y) \mid (x, y) \in X.Y \} \quad (102)$$

q) Seja $R_1(x, y), (x, y) \in X.Y$ e $R_2(y, z), (y, z) \in Y.Z$, duas relações difusas. A composição max-min, $R_1 \max\text{-min } R_2$ é então o conjunto difuso:

$$R_1 \circ R_2 = \{(x, z) \mid \max \{ \min \{ f_{R_1}(x, y), f_{R_2}(y, z) \} \} \mid x \in X, y \in Y, z \in Z\} \quad (103)$$

2.5.3 ESTIMATIVA DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

A função de pertinência é utilizada para medir o grau de pertinência de um elemento a um conjunto. Quando o conjunto é difuso, o grau de pertinência assume um valor no intervalo $[0, 1]$.

Na aplicação da Teoria dos Conjuntos Difusos, um dos tópicos mais importantes é a estimação da função de pertinência, pois uma estimativa adequada valida os resultados obtidos pela utilização da álgebra difusa.

Os pontos importantes a serem considerados na estimação são a forma, os parâmetros e o domínio da função (Devi e Sarma, 1985).

A seguir, são apresentados os métodos mais utilizados para estimação das funções de pertinência.

2.5.3.1 MÉTODO BASEADO EM HISTOGRAMA

Neste método, é construído um histograma que descreve os dados considerados. De acordo com Devi e Sarma (1985), o número de classes do histograma para um nível de significância de 0,005 é obtido pela seguinte fórmula:

$$m = 1,87 (n - 1)^{2/5} \quad (104)$$

onde: m = número de classes

n = tamanho da amostra

Pode ser utilizada uma função racional para estimar a função de pertinência a partir do histograma, ajustando os parâmetros pelo método dos mínimos quadrados, sendo que a função deve ser normalizada.

Uma outra forma de se obter a função de pertinência baseada em histograma é estimando inicialmente a função densidade de probabilidade ($p(x)$). A função de pertinência é então estimada da seguinte forma:

(105)

$$f(x) = \begin{cases} p(x), & \text{se } \beta \cdot p(x) \leq 1 \\ 1, & \text{se } \beta \cdot p(x) > 1 \end{cases}$$

onde a constante β é um parâmetro de ajuste.

2.5.3.2 MÉTODO BASEADO NO CONSENSO DE ESPECIALISTAS

Neste método, a função de pertinência é obtida com base em opiniões subjetivas de especialistas da área considerada. São feitas entrevistas com especialistas com o objetivo de valorar declarações lingüísticas. Dada uma declaração do tipo “X é Y”, o especialista deve manifestar sua concordância ou não com essa declaração. Essa concordância pode ser expressa na forma binária (sim ou não) ou na forma multivalorada (por exemplo, numa escala de 0 a 10).

A partir dessas respostas, são calculadas as frequências relativas (no caso binário) ou a média dos graus de concordância (no caso multivalorado). É, então, construído um gráfico dos pontos assim obtidos, e ajustada uma função, estimando-se os parâmetros através dos mínimos quadrados, sendo essa função normalizada.

2.5.4 RACIOCÍNIO DIFUSO

A partir da Teoria dos Conjuntos Difusos, vários outros autores têm discutido o raciocínio difuso e suas aplicações. Entre eles, pode-se citar: Mandani (1977); Mizumoto e Zimmermann (1982); Mizumoto (1985); Kiszka, Kochanska e Sliwnska (1985); Mizumoto (1988) e Yu, Cao e Kandel (1990).

Raciocínio Difuso é entendido por Dubois e Prade (1980) como o processo ou processos na qual uma conclusão, possivelmente imprecisa, é deduzida de uma coleção de premissas imprecisas. Tal raciocínio é, na maioria dos casos, antes qualitativo do que quantitativo por natureza, e quase sempre esta posicionado fora do domínio de aplicabilidade da lógica clássica.

As lógicas, como base para o raciocínio, podem ser distinguidas essencialmente por três itens:

- valores verdade;
- vocabulário (operadores), e
- processo de raciocínio.

Na lógica clássica, os valores verdade são "zero" ou "um", e o vocabulário é definido através desses valores verdade sob a forma de tabelas verdade.

A lógica difusa baseia-se nas lógicas multivaloradas, em que os valores verdade variam no intervalo $[0, 1]$. Zadeh (1973) diz que a lógica difusa é uma extensão da lógica multivalorada, em que os valores verdade são variáveis lingüísticas.

Os modelos de raciocínio difuso são considerados muito úteis na resolução de problemas práticos, como, por exemplo, na aplicação de controle operacional. O uso de um controlador, baseado em lógica difusa, fornece um meio para converter uma estratégia de controle lingüístico, baseada em conhecimento de especialistas, em uma estratégia de controle automático.

Para incluir as ações do controle operacional de um sistema de atomização em um sistema computacional, torna-se necessário um método de descrição da estratégia utilizada, ou seja, as descrições verbais devem passar para uma relação funcional, e esta deve representar o conhecimento do especialista.

Desta forma, a teoria dos conjuntos difusos fornece um instrumento adequado para modelar situações em que ocorram imprecisões e/ou incertezas.

Os sistemas de controle lógico difuso, baseados em raciocínio difuso, fornecem um meio de converter estratégias de controle lingüístico em estratégias de controle automático.

O controle operacional de um sistema de atomização apresenta características que dificultam o uso de métodos convencionais, devido à falta de dados quantitativos referentes às relações de entrada e saída. Por essa razão, é proposto um modelo apresentado no capítulo seguinte, baseado em controle lógico difuso.

CAPÍTULO 3 - SECAGEM EM LABORATÓRIO

Este capítulo tem por objetivo fundamentar e demonstrar a técnica da secagem por atomização empregada tanto em laboratórios de avaliação como em indústrias cerâmicas, avaliando as possibilidades de utilizar os dados obtidos em laboratório para calibrar um atomizador industrial.

3.1 O EQUIPAMENTO:

Um esquema do equipamento utilizado é apresentado na figura 41. O material a ser secado é colocado em uma bandeja circular (a), que consiste de um cilindro oco de aço inoxidável em cujo fundo esta acoplada uma malha para suporte do material.

A bandeja é sujeitada por tirantes à uma balança (c), que tem por objetivo avaliar a variação de peso da amostra. Tal balança é acondicionada sobre uma plataforma que pode subir ou baixar de forma automática, mediante um acionador elétrico.

A vazão de ar é regulada por uma válvula de gaveta (f) e é medida por um orifício (g), previamente calibrado e conectado a um manômetro diferencial de água (i). O manômetro em U de ramo aberto (h), permite a medida da pressão estática do ar de entrada do orifício medidor.

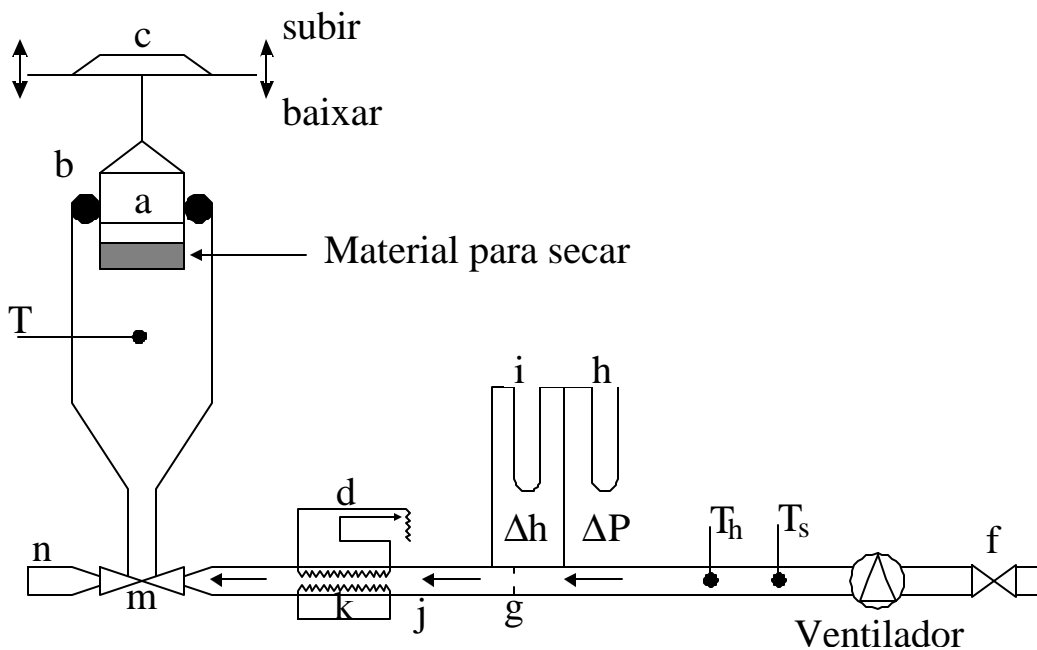


Figura 41 - esquema do equipamento utilizado na execução do ensaio de secagem.

O ar é aquecido ao passar por tubo (j) que possui em seu interior duas resistências, uma fixa (k) e uma variável (d) conectada a um reostato. Este último permite variar a intensidade da corrente que circula pela resistência, permitindo assim uma regulação da temperatura do ar de secagem. Tal temperatura é controlada por um termômetro (t), situado imediatamente antes da bandeja de secagem.

A umidade do ar utilizado é determinada com a ajuda de um termômetro de bulbo seco (ts) e um de bulbo úmido (th).

Finalmente, é colocada uma válvula de tripla passagem (m) que permite desviar a corrente de ar para a bandeja (a) ou para o exterior (n).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 CALIBRAGEM DO ORIFÍCIO MEDIDOR DE AR

Um medidor de gases do tipo turbina é conectado a saída dos gases (ponto n), onde a corrente de ar é desviada previamente por meio da válvula “m”.

Para cada valor da vazão de ar ensaiada é medida a quantidade de gás que passa pelo medidor e o tempo que este gasta para executar todo o percurso, assim como os valores da diferença de altura no manômetro diferencial (ΔP_0) e sua temperatura (T_0).

3.2.2 O EXPERIMENTO DE SECAGEM

Para iniciar o experimento de secagem, é necessário que a instalação já tenha alcançado as condições de operação exigidas para o determinado experimento (com o suporte vazio), e que estas condições também já estejam estabilizadas.

Transcorrido este tempo, a passagem de ar pela câmara é desviada, o material a ser ensaiado é colocado no suporte, de modo a que cubra totalmente o fundo do suporte. Neste momento o ar é desviado novamente para o interior da câmara (tempo zero), registrando a partir deste momento sua perda de peso em função do tempo.

Para determinar a perda de peso, a corrente de ar é desviada para a saída “n” e o suporte é colocado em uma posição em que fique somente acionando a balança, a leitura representará a perda de massa para cada tempo de secagem. Para reiniciar o experimento, se procede de forma inversa. O tempo investido nesta operação de verificação não é contabilizado como tempo de secagem.

São efetuadas verificações aos 2, 4, 6 e 10 minutos, posteriormente a cada 5 minutos até que não sejam observadas mais variações de peso em duas medidas consecutivas, quando então é finalizado o experimento.

A vazão de ar é medida pelo orifício previamente calibrado.

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SECAGEM

São realizados 4 (quatro) ensaios, variando a velocidade do ar e mantendo o resto das variáveis constantes ($T=60^{\circ}\text{C}$).

Neste ensaio deve ser determinada a velocidade mínima de circulação do ar, para que esta variável não influencie na velocidade de secagem, ou seja, que a etapa controlante do processo seja a difusão da água no interior do sólido.

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM

Este ensaio deve ser realizado a uma velocidade de circulação do ar igual ou ligeiramente superior ao resultado obtido no tópico anterior.

Fixada esta velocidade, são realizados 4 (quatro) ensaios nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70oC, mantendo constantes o resto das variáveis.

3.2.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

- a) Calibragem do orifício medidor: Todos os tempos tomados para a realização deste ensaio foram fixados em incrementos de 3 (três) minutos, portanto T=3min, para todos os valores.

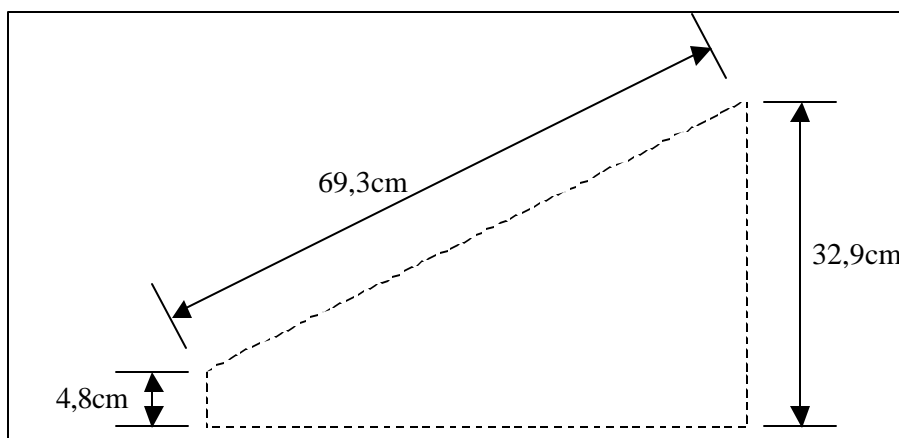


Figura 42 – Representação para cálculo da inclinação do manômetro.

$$\text{sen}(x) = \frac{32,9 - 4,8}{69,3} = 0,4054834 \rightarrow x = 23,92^\circ$$

Como os incrementos de h e de Po que aparecem na tabela 3, obtida em laboratório, são relativos ao trecho inclinado, estes devem ser convertidos. São transladados com o “x” ao seu homólogo vertical: Cateto oposto = L * sen(x) = L * 0.4054834

TEMPO (minutos)	VOLUME (m ³)	Δ h (mm H ₂ O)	Δ Po (mm H ₂ O)
0	116,31	95+18	92+18
3	116,32+116,38	120+19	96+20

3	116,78+117,25	120+19	96+20
3	117,62+118,18	123+23	97+21
3	118,18+118,75	123+23	97+21
3	120,16+120,90	131+33	96+22
3	120,90+121,64	131+33	96+22
3	122,94+123,82	135+35	98+23
3	123,82+124,69	135+35	98+23
3	125,84+127,03	152+50	67+27
3	127,03+128,22	152+50	67+27
3	131,10+132,42	158+58	69+30
3	132,42+133,74	158+58	69+30
3	135,00+136,36	160+60	102+30
3	136,36+137,71	160+60	102+30

Tabela 3 – Dados experimentais de Calibragem do orifício de medição.

$V_{\text{patm}} \rightarrow$ Volume de gás registrado no medidor (na pressão atmosférica)

$V_0 \rightarrow$ Volume de gás nas condições do orifício. É calculado pela aplicação da lei dos gases:

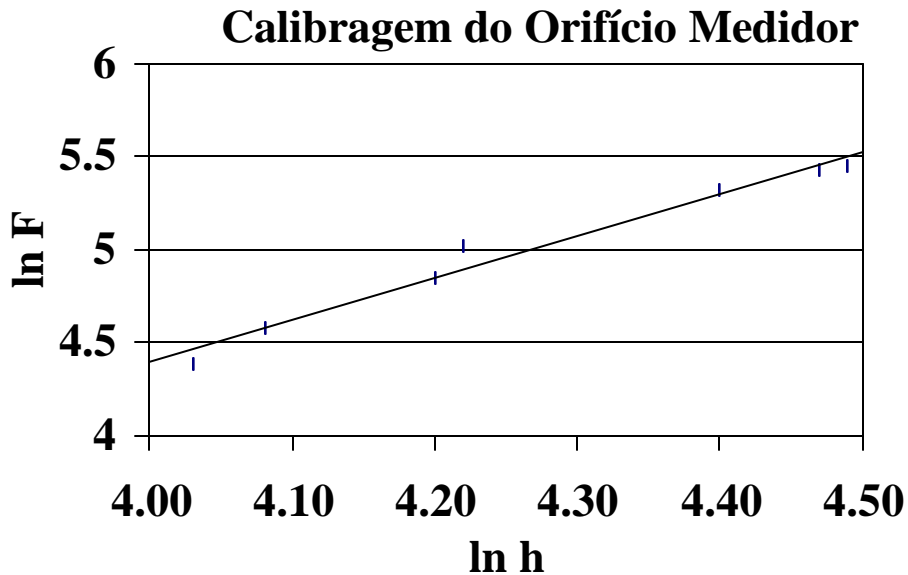
$$V_{\text{Patm}} \times P_{\text{atm}} = V_0 \times P_0$$

$$q_G = \frac{V_0}{\text{tempo}} (m^3 / h), \quad M=28,9 \text{ g/mol}, \quad T_0=(K), \quad P_{\text{atm}}=(mmHg), \quad \text{e} \quad F = q_G \sqrt{\frac{P_0 \times M}{T_0}}$$

V_{Patm} (m ³)	Δh_m (mmH ₂ O)	$\ln \Delta h_m$	ΔP_0 (mmH ₂ O)	P_0 (mmHg)	V_0 (m ³)	Q_G (m ³ /h)	F	$\ln F$
0,46	56,362	4.03179	47,036	763,48	0,4579	9,1580	79,472	4,37541
0,47	56,362	4.03179	47,036	763,48	0,4678	9,3570	81,200	4,39692
0,56	59,200	4.08092	47,847	763,54	0,5574	11,148	96,745	4,57208
0,57	59,200	4.08092	47,847	763,54	0,5673	11,347	98,472	4,58977
0,74	66,499	4.19719	47,847	763,54	0,7365	14,731	127,841	4,85079
0,74	66,499	4.19719	47,847	763,54	0,7365	14,731	127,841	4,85079
0,88	68,932	4.23312	49,063	763,63	0,8758	17,516	152,019	5.02401
0,87	68,932	4.23312	49,063	763,63	0,8658	17,317	150,291	5.01257
1,19	81,907	4.40559	38,115	762,82	1,1850	23,711	205,680	5.32632
1,19	81,907	4.40559	38,115	762,82	1,1850	23,711	205,680	5.32632
1,32	87,584	4.47260	40,142	762,97	1,3148	26,297	228,127	5.42990
1,32	87,584	4.47260	40,142	762,95	1,3148	26,297	228,127	5.42990
1,36	89,206	4.49095	53,523	763,96	1,3529	27,058	234,880	5.45907
1,35	89,206	4.49095	53,523	763,96	1,3429	26,859	233,160	5.45172

Tabela 4 – Tabela de calibragem do orifício de medição.

Figura 43 – Representação gráfica dos logaritmos $\ln h = \ln \Delta h_m$ e $\ln F = \ln (q_G * ((P_0 * M) / T_0)^{1/2})$.



3.2.4 VALORES FIXOS:

$$S(\text{peneira}) = p \times r^2 = p \times \frac{D^2}{4} = \frac{p}{4} \times D^2 = \frac{p}{4} \times 0.107^2 \cong 0.009 m^2$$

(106)

$$G = q_G \times \frac{d}{S}$$

(107)

$$p \times V = n \times R \times T \therefore d = \frac{m}{V} = P_0 \times \frac{M}{R \times T} = \frac{\Delta P_0 + 760}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (T + 273)}$$

(108)

3.2.5 FORMULAS A SEREM UTILIZADAS:

$$\text{Peso} = (\text{peso inicial de material}) + \Delta P(\text{incremento de peso})$$

(109)

O último termo da expressão recebe o sinal positivo uma vez que os incrementos de peso medidos são negativos (perda de peso).

ΔP = incrementos de peso, são fornecidos pelas tabelas obtidas em laboratório;

$P_{\text{água}}$ = Peso de H_2O ;

$$P1 = \text{Peso inicial de água;}$$

(110)

$$\text{Págua} = \text{Peso de H}_2\text{O} = \text{Peso inicial de água} + \Delta P; \quad (111)$$

$$\tau = (\text{Peso de H}_2\text{O})/(\text{Peso de sólido seco}); \quad (112)$$

$$\tau_e = (\text{peso de H}_2\text{O ao final secagem})/(\text{peso do sólido seco ao final secagem}); \quad (113)$$

$$\tau_o = (\text{peso de H}_2\text{O no início secagem})/(\text{peso do sólido seco no início secagem}). \quad (114)$$

$$\text{Calibragem} = F = q_G \times \sqrt{\frac{P_0 \times M}{T_0}} \quad (\text{kg}) \quad (115)$$

$$d = \frac{\Delta P_0 + 760}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (63 + 273)} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (116)$$

3.3 EXPERIMENTOS COM VARIAÇÕES DE VAZÃO

3.3.1 VAZÃO 1

$$T = 63^\circ\text{C} \quad T_0 = 336 \text{ K} \quad P(\text{atm}) = 760 \text{ mmHg}$$

$$\Delta h = (117+20) \times 0.40548 = 55.55076 \text{ mmHg}$$

$$\Delta P_0 = (96+23) \times 0.40548 = 48.25212 \text{ mmHg}$$

$$P_0 = 808.25 \text{ mmHg} \quad q_G = \Delta h_m \quad F = 4.39661302 \text{ kg}$$

$$d = \frac{48.252 + 760}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (63 + 273)} = 1.115522 \text{ kg/m}^3$$

$$q_G = \frac{4.39664302}{\sqrt{\frac{808.252 \times 28.9}{336}}} = 0.527313 \text{ m}^3/\text{h} \quad G = q_G \times \frac{d}{S} = 65.358813 \text{ kg/h.m}^2$$

Peso inicial do material úmido	→	$P_1 = 44.95 \text{ g}$
Peso do material após a passagem pelo secador	→	$P_2 = 34.26 \text{ g}$
Peso do material após a passagem pela estufa	→	$P_3 = 33.71 \text{ g}$

Peso inicial de H₂O ($P_{H_2O} = P_1 - P_3$)

$$\rightarrow P_{H_2O} = 11.24 \text{ g}$$

Peso = $P_1 + \Delta(Peso)$

Peso de H₂O = $P_{H_2O} + \Delta(Peso)$

\

$$t_e = \frac{34.26 - 33.71}{33.71} = 0.01631 \text{ g}$$

$$t_0 = \frac{11.24}{33.71} = 0.333432 \text{ g}$$

$$t = \frac{11.24 + \Delta(Peso)}{33.71}$$

$$s = \frac{t - t_e}{t_o - t_e}$$

Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	P_{H_2O}	τ	σ	$\sigma \times 100$
2	0.033	42.37	-2.58	8.66	0.2569	0.7587	75.87
4	0.066	39.79	-5.16	6.08	0.1804	0.5173	51.73
6	0.100	37.90	-7.05	4.19	0.1243	0.3405	34.05
10	0.166	36.28	-8.67	2.57	0.0762	0.1890	18.90
15	0.250	35.43	-9.52	1.72	0.0510	0.1094	10.94
20	0.333	34.97	-9.98	1.26	0.0374	0.0664	6.64
25	0.416	34.72	-10.23	1.01	0.0300	0.0430	4.30
30	0.500	34.61	-10.34	0.90	0.0267	0.0327	3.27
35	0.583	34.46	-10.49	0.75	0.0222	0.0187	1.87
40	0.666	34.36	-10.59	0.65	0.0193	0.0094	0.94
45	0.750	34.30	-10.65	0.59	0.0175	0.0037	0.37
50	0.833	34.25	-10.70	0.54	0.0160	-0.0009	-0.09
55	0.916	34.24	-10.71	0.53	0.0157	-0.0019	-0.19
60	1.000	34.24	-10.71	0.53	0.0157	-0.0019	-0.19

Tabela 5 – tabela experimental referente a vazão 1.

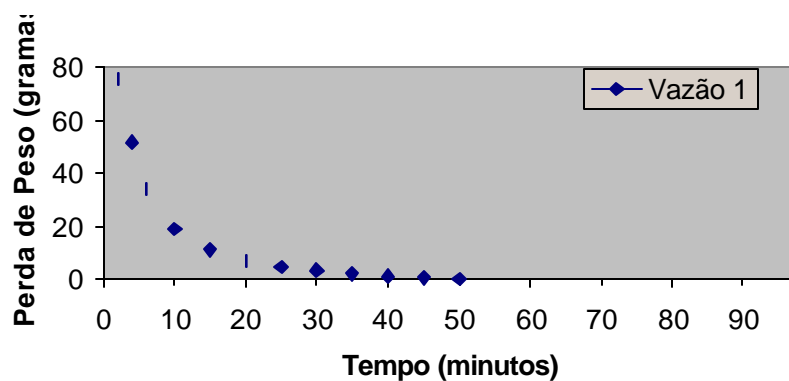


Figura 44 – Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 1

3.3.2 Vazão 2

$T = 63^\circ\text{C}$

$T_0 = 336 \text{ K}$

$P(\text{atm}) = 760 \text{ mmHg}$

$\Delta h = (128+31) \times 0.40548 = 64.47132 \text{ mmHg}$

$\Delta P_0 = (98+25) \times 0.40548 = 49.87404 \text{ mmHg}$

$P_0 = 809.874 \text{ mmHg}$

$q_G = \Delta h_m$

$F = 4.7445 \text{ kg}$

$$d = \frac{809.874}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (63 + 273)} = 1.1776 \text{ kg/m}^3$$

$$q_G = \frac{4.7445}{\sqrt{\frac{809.87404 \times 28.9}{336}}} = 0.56846 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$G = q_G \times \frac{d}{S} = 74.3803 \text{ kg/h.m}^2$$

Peso inicial do material úmido

$$\rightarrow P_1 = 43.37 \text{ g}$$

Peso do material após a passagem pelo secador

$$\rightarrow P_2 = 33.05 \text{ g}$$

Peso do material após a passagem pela estufa

$$\rightarrow P_3 = 32.57 \text{ g}$$

Peso inicial de H₂O ($P_{H_2O} = P_1 - P_3$)

$$\rightarrow P_{H_2O} = 10.80 \text{ g}$$

Peso = $P_1 + \Delta(Peso)$

Peso de H₂O = $P_{H_2O} + \Delta(Peso)$

$$t_e = \frac{33.05 - 32.57}{32.57} = 0.01474 \text{ g}$$

$$t_o = \frac{10.80}{32.57} = 0.33159 \text{ g}$$

$$t = \frac{10.80 + \Delta(Peso)}{32.57}$$

$$s = \frac{t - t_e}{t_o - t_e}$$

Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	P _{H₂O}	τ	σ	$\sigma \times 100$
2	0.033	40.06	-3.31	7.49	0.2300	0.6793	67.93
4	0.066	37.61	-5.76	5.04	0.1547	0.4419	44.19
6	0.100	36.34	-7.03	3.77	0.1158	0.3188	31.88
10	0.166	35.00	-8.37	2.43	0.0746	0.1890	18.90
15	0.250	34.25	-9.12	1.68	0.0516	0.1163	11.63
20	0.333	33.86	-9.51	1.29	0.0396	0.0785	7.85
25	0.416	33.63	-9.74	1.06	0.0325	0.0562	5.62
30	0.500	33.49	-9.88	0.92	0.0282	0.0426	4.26
35	0.583	33.39	-9.98	0.82	0.0252	0.0329	3.29
40	0.666	33.31	-10.06	0.74	0.0227	0.0252	2.52
45	0.750	33.25	-10.12	0.68	0.0209	0.0194	1.94
50	0.833	33.23	-10.14	0.66	0.0203	0.0174	1.74
55	0.916	33.19	-10.18	0.62	0.0190	0.0136	1.36
60	1.000	33.16	-10.21	0.59	0.0181	0.0107	1.07
65	1.080	33.13	-10.24	0.56	0.0172	0.0078	0.78
70	1.160	33.12	-10.25	0.55	0.0169	0.0068	0.68
75	1.250	33.11	-10.26	0.54	0.0166	0.0058	0.58
80	1.330	33.11	-10.26	0.54	0.0166	0.0058	0.58

Tabela 6 – tabela experimental referente a vazão 2.

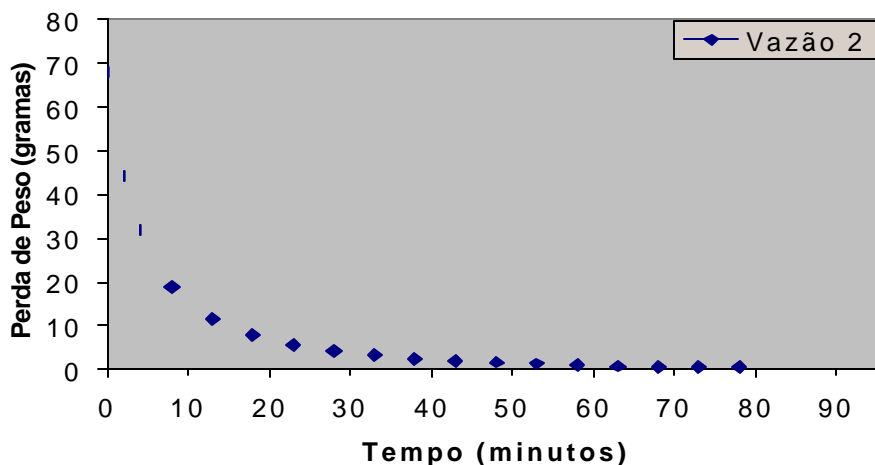


Figura 45 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 2

3.3.3 VAZÃO 3

$$T = 63^{\circ}\text{C} \quad T_0 = 336 \text{ K} \quad P(\text{atm}) = 760 \text{ mmHg}$$

$$\Delta h = (150+48) \times 0.40548 = 80.28500 \text{ mmHg}$$

$$\Delta P_0 = (110+30) \times 0.40548 = 56.76720 \text{ mmHg}$$

$$P_0 = 816.7672 \text{ mmHg} \quad q_G = \Delta h_m \quad F = 4.4472 \text{ kg}$$

$$d = \frac{816.767}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (63 + 273)} = 1.2839 \text{ kg/m}^3$$

$$q_G = \frac{4.4472}{\sqrt{\frac{816.7672 \times 28.9}{336}}} = 0.5306 \text{ m}^3/\text{h} \quad G = q_G \times \frac{d}{S} = 75.6915 \text{ kg/h.m}^2$$

Peso inicial do material úmido

$$\rightarrow P_1 = 42.25 \text{ g}$$

Peso do material após a passagem pelo secador

$$\rightarrow P_2 = 31.91 \text{ g}$$

Peso do material após a passagem pela estufa

$$\rightarrow P_3 = 31.42 \text{ g}$$

Peso inicial de H_2O ($P_{\text{H}_2\text{O}} = P_1 - P_3$)

$$\rightarrow P_{\text{H}_2\text{O}} = 10.83 \text{ g}$$

Peso = $P_1 + \Delta(\text{Peso})$

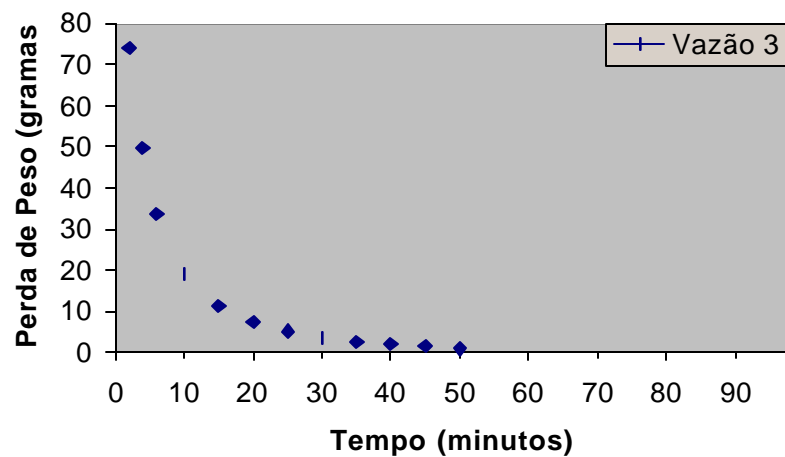
Peso de $\text{H}_2\text{O} = P_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta(\text{Peso})$

$$t_e = \frac{31.91 - 31.42}{31.42} = 0.01559 \text{ g}$$

$$t_0 = \frac{10.83}{31.42} = 0.34468 \text{ g}$$

$$t = \frac{10.83 + \Delta(\text{Peso})}{31.42}$$

$$s = \frac{t - t_e}{t_0 - t_e}$$



Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	P_{H_2O}	τ	σ	$\sigma \times 100$
2	0.033	39.55	-2.70	8.13	0.2588	0.7389	73.89
4	0.066	37.04	-5.21	5.62	0.1789	0.4961	49.61
6	0.100	35.38	-6.87	3.96	0.1260	0.3356	33.56
10	0.166	33.88	-8.37	2.46	0.0783	0.1905	19.05
15	0.250	33.06	-9.19	1.64	0.0522	0.1112	11.12
20	0.333	32.69	-9.56	1.27	0.0404	0.0754	7.54
25	0.416	32.44	-9.81	1.02	0.0325	0.0513	5.13
30	0.500	32.28	-9.97	0.86	0.0274	0.0358	3.58
35	0.583	32.16	-10.09	0.74	0.0236	0.0242	2.42
40	0.666	32.11	-10.14	0.69	0.0220	0.0193	1.93
45	0.750	32.05	-10.20	0.63	0.0201	0.0135	1.35
50	0.833	31.99	-10.26	0.57	0.0181	0.0077	0.77
55	0.916	31.90	-10.35	0.48	0.0153	-0.0010	-0.10
60	1.000	31.89	-10.36	0.47	0.0150	-0.0019	-0.19
65	1.080	31.89	-10.36	0.47	0.0150	-0.0019	-0.19

Tabela 7 – tabela experimental referente a vazão 3.

Figura 46 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 3.

3.3.4 VAZÃO 4

$$T = 63\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_0 = 336\text{ K} \quad P(\text{atm}) = 760\text{ mmHg}$$

$$\Delta h = (180+77) \times 0.40548 = 104.2083\text{ mmHg}$$

$$\Delta P_0 = (108+33) \times 0.40548 = 57.17268\text{ mmHg}$$

$$P_0 = 817.1726\text{ mmHg} \quad q_G = \Delta h_m \quad F = 4.4638\text{ kg}$$

$$d = \frac{817.172}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (63 + 273)} = 1.1278 \text{ kg/m}^3$$

$$q_G = \frac{4.4638}{\sqrt{\frac{817.1727 \times 28.9}{336}}} = 0.5324 \text{ m}^3/\text{h} \quad G = q_G \times \frac{d}{S} = 66.7203 \text{ kg/h.m}^2$$

Peso inicial do material úmido $\rightarrow P_1 = 43.67 \text{ g}$
 Peso do material após a passagem pelo secador $\rightarrow P_2 = 33.05 \text{ g}$
 Peso do material após a passagem pela estufa $\rightarrow P_3 = 32.62 \text{ g}$
 Peso inicial de H_2O ($P_{\text{H}_2\text{O}} = P_1 - P_3$) $\rightarrow P_{\text{H}_2\text{O}} = 11.05 \text{ g}$
 Peso = $P_1 + \Delta(\text{Peso})$
 Peso de $\text{H}_2\text{O} = P_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta(\text{Peso})$

$$t_e = \frac{33.05 - 32.62}{32.62} = 0.013182 \text{ g}$$

$$t_o = \frac{11.05}{32.62} = 0.3387492 \text{ g}$$

$$t = \frac{11.05 + \Delta(\text{Peso})}{32.62}$$

$$s = \frac{t - t_e}{t_o - t_e}$$

Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	$P_{\text{H}_2\text{O}}$	τ	σ	$\sigma \times 100$
2	0.033	40.26	-3.41	7.64	0.2342	0.6789	67.89
4	0.066	37.52	-6.15	4.90	0.1502	0.4209	42.09
6	0.100	35.64	-8.03	3.02	0.0926	0.2439	24.39
10	0.166	34.80	-8.87	2.18	0.0668	0.1648	16.48
15	0.250	34.08	-9.59	1.46	0.0448	0.0970	9.70
20	0.333	33.74	-9.93	1.12	0.0343	0.0650	6.50
25	0.416	33.47	-10.20	0.85	0.0261	0.0395	3.95
30	0.500	33.33	-10.34	0.71	0.0218	0.0264	2.64
35	0.583	33.23	-10.44	0.61	0.0187	0.0169	1.69
40	0.666	33.23	-10.44	0.61	0.0187	0.0169	1.69

Tabela 8 – tabela experimental referente a vazão 4.

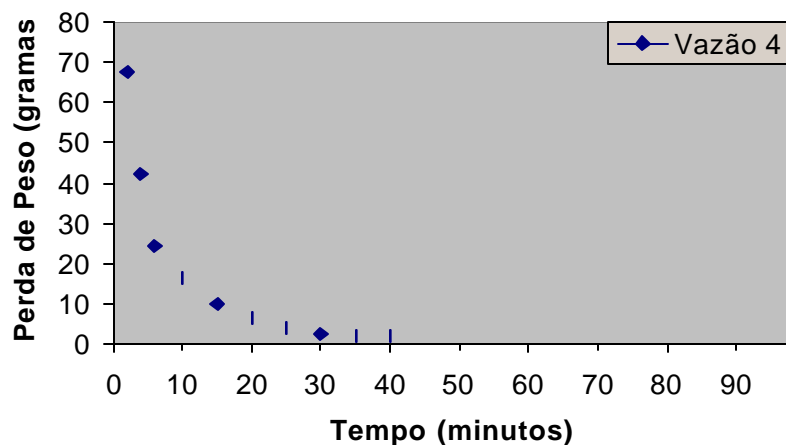


Figura 47 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 4.

3.3.5 VAZÃO 5

$$T = 40^{\circ}\text{C} \quad T_0 = 316 \text{ K} \quad P(\text{atm}) = 760 \text{ mmHg}$$

$$\Delta h = (150+48) \times 0.40548 = 80.28500 \text{ mmHg}$$

$$\Delta P_0 = (110+30) \times 0.40548 = 56.76720 \text{ mmHg}$$

$$P_0 = 816.7672 \text{ mmHg} \quad q_G = \Delta h_m \quad F = 4.4472 \text{ kg}$$

$$d = \frac{816.767}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (40 + 273)} = 1.2101 \text{ kg/m}^3$$

$$q_G = \frac{4.4472}{\sqrt{\frac{816.7672 \times 28.9}{313}}} = 0.5121 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$G = q_G \times \frac{d}{S} = 68.8556 \text{ kg/h.m}^2$$

Peso inicial do material úmido

$$\rightarrow P_1 = 45.23 \text{ g}$$

Peso do material após a passagem pelo secador

$$\rightarrow P_2 = 34.63 \text{ g}$$

Peso do material após a passagem pela estufa

$$\rightarrow P_3 = 33.93 \text{ g}$$

Peso inicial de H₂O ($P_{\text{H}_2\text{O}} = P_1 - P_3$)

$$\rightarrow P_{\text{H}_2\text{O}} = 11.29 \text{ g}$$

Peso = $P_1 + \Delta(Peso)$

Peso de H₂O = $P_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta(Peso)$

$$t_e = \frac{34.63 - 33.93}{33.93} = 0.02063 \text{ g}$$

$$t_0 = \frac{11.29}{33.93} = 0.33273 \text{ g}$$

$$t = \frac{11.29 + \Delta(Peso)}{33.93}$$

$$s = \frac{t - t_e}{t_0 - t_e}$$

Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	$P_{\text{H}_2\text{O}}$	τ	σ	$\sigma \times 100$
2	0.033	43.46	-1.77	9.53	0.2809	0.8330	83.30
4	0.066	41.78	-3.45	7.85	0.2314	0.6745	67.45
6	0.100	40.08	-5.15	6.15	0.1813	0.5142	51.42
10	0.166	38.01	-7.22	4.08	0.1202	0.3189	31.89
15	0.250	36.58	-8.65	2.65	0.0781	0.1840	18.40
20	0.333	36.00	-9.23	2.07	0.0610	0.1292	12.92
25	0.416	35.35	-9.88	1.42	0.0419	0.0679	6.79
30	0.500	35.19	-10.04	1.26	0.0371	0.0528	5.28
35	0.583	35.03	-10.20	1.10	0.0324	0.0377	3.77
40	0.666	34.87	-10.36	0.94	0.0277	0.0226	2.26
45	0.750	34.82	-10.41	0.89	0.0262	0.0179	1.79
50	0.833	34.77	-10.46	0.84	0.0248	0.0132	1.32
55	0.916	34.66	-10.57	0.73	0.0215	0.0028	0.28
60	1.000	34.59	-10.64	0.66	0.0195	-0.0038	-0.38
65	1.080	34.58	-10.65	0.65	0.0192	-0.0047	-0.47
70	1.160	34.58	-10.65	0.65	0.0192	-0.0047	-0.47

Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	P _{H₂O}	τ	σ	$\sigma \times 100$
--------------	-----------	----------	------------	-----------------------------	--------	----------	---------------------

Tabela 9 – tabela experimental referente a vazão 5.

Figura 48 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 5.

3.3.6 VAZÃO 6

$$T = 50\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_0 = 323\text{ K} \quad P(\text{atm}) = 760\text{ mmHg}$$

$$\Delta h = (150+48) \times 0.40548 = 80.28500\text{ mmHg}$$

$$\Delta P_0 = (110+30) \times 0.40548 = 56.76720\text{ mmHg}$$

$$P_0 = 816.7672\text{ mmHg} \quad q_G = \Delta h_m \quad F = 4.4472\text{ kg}$$

$$d = \frac{816.767}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (50 + 273)} = 1.1726\text{ kg/m}^3$$

$$q_G = \frac{4.4472}{\sqrt{\frac{816.7672 \times 28.9}{323}}} = 0.5202\text{ m}^3/\text{h} \quad G = q_G \times \frac{d}{S} = 67.7788\text{ kg/h.m}^2$$

$$\text{Peso inicial do material úmido} \rightarrow P_1 = 42.25\text{ g}$$

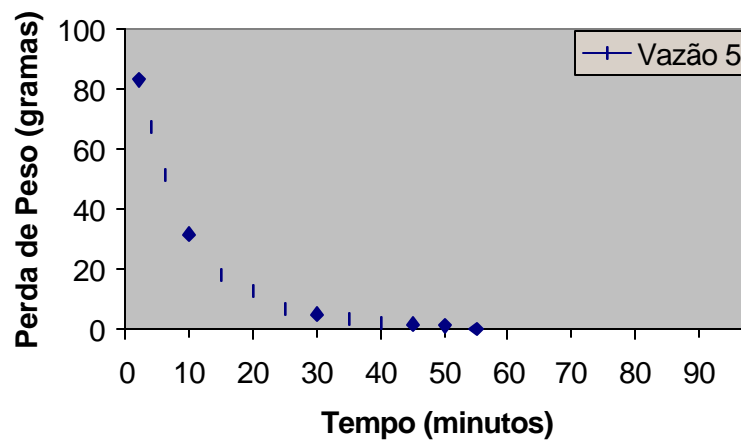
$$\text{Peso do material após a passagem pelo secador} \rightarrow P_2 = 31.91\text{ g}$$

$$\text{Peso do material após a passagem pela estufa} \rightarrow P_3 = 31.42\text{ g}$$

$$\text{Peso inicial de H}_2\text{O} (P_{\text{H}_2\text{O}} = P_1 - P_3) \rightarrow P_{\text{H}_2\text{O}} = 10.83\text{ g}$$

$$\text{Peso} = P_1 + \Delta(\text{Peso})$$

$$\text{Peso de H}_2\text{O} = P_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta(\text{Peso})$$



$$t_e = \frac{31.91 - 31.42}{31.42} = 0.01559 \text{ g}$$

$$t_0 = \frac{10.83}{31.42} = 0.34468 \text{ g}$$

$$t = \frac{10.83 + \Delta(Peso)}{31.42}$$

$$s = \frac{t - t_e}{t_0 - t_e}$$

Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	PH ₂ O	τ	σ	$\sigma \times 100$
2	0.033	40.76	-2.95	7.98	0.2434	0.7166	71.66
4	0.066	38.60	-5.11	5.82	0.1775	0.5091	50.91
6	0.100	36.95	-6.76	4.17	0.1272	0.3506	35.06
10	0.166	35.41	-8.30	2.63	0.0802	0.2027	20.27
15	0.250	34.54	-9.17	1.76	0.0537	0.1191	11.91
20	0.333	34.12	-9.59	1.34	0.0409	0.0788	7.88
25	0.416	33.90	-9.81	1.12	0.0342	0.0576	5.76
30	0.500	33.72	-9.99	0.94	0.0287	0.0403	4.03
35	0.583	33.60	-10.11	0.82	0.0250	0.0288	2.88
40	0.666	33.50	-10.21	0.72	0.0220	0.0192	1.92
45	0.750	33.44	-10.27	0.66	0.0201	0.0134	1.34
50	0.833	33.41	-10.30	0.63	0.0192	0.0106	1.06
55	0.916	33.38	-10.33	0.60	0.0183	0.0077	0.77
60	1.000	33.37	-10.34	0.59	0.0180	0.0067	0.67
65	1.080	33.37	-10.34	0.59	0.0180	0.0067	0.67

Tabela 10 – tabela experimental referente a vazão 6

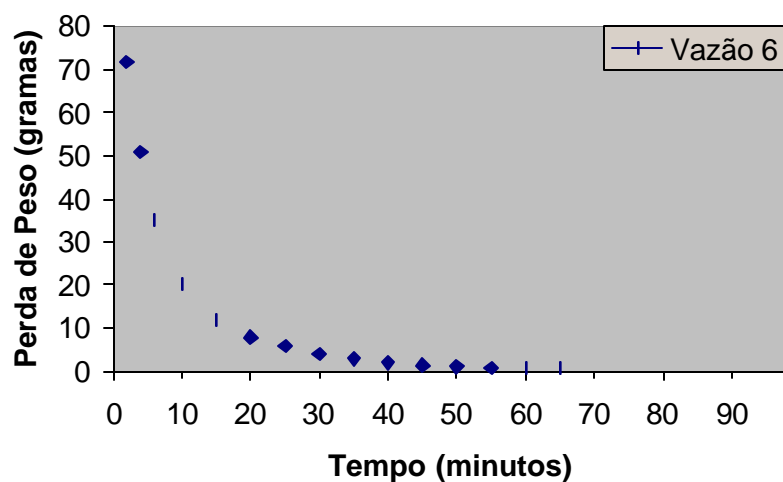


Figura 49 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 6.

3.3.7 VAZÃO 7

$$T = 70^\circ\text{C} \quad T_0 = 343 \text{ K} \quad P(\text{atm}) = 760 \text{ mmHg}$$

$$\Delta h = (150+48) \times 0.40548 = 80.28500 \text{ mmHg}$$

$$\Delta P_0 = (110+30) \times 0.40548 = 56.76720 \text{ mmHg}$$

$$P_0 = 816.7672 \text{ mmHg} \quad q_G = \Delta h_m \quad F = 4.4472 \text{ kg}$$

$$d = \frac{816.767}{760} \times \frac{28.9}{0.082 \times (63 + 273)} = 1.2839 \text{ kg/m}^3$$

$$q_G = \frac{4.4472}{\sqrt{\frac{816.7672 \times 28.9}{336}}} = 0.5306 \text{ m}^3/\text{h} \quad G = q_G \times \frac{d}{S} = 75.6915 \text{ kg/h.m}^2$$

$$\text{Peso inicial do material úmido} \rightarrow P_1 = 42.25 \text{ g}$$

$$\text{Peso do material após a passagem pelo secador} \rightarrow P_2 = 31.91 \text{ g}$$

$$\text{Peso do material após a passagem pela estufa} \rightarrow P_3 = 31.42 \text{ g}$$

$$\text{Peso inicial de H}_2\text{O} (P_{\text{H}_2\text{O}} = P_1 - P_3) \rightarrow P_{\text{H}_2\text{O}} = 10.83 \text{ g}$$

$$\text{Peso} = P_1 + \Delta(\text{Peso})$$

$$\text{Peso de H}_2\text{O} = P_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta(\text{Peso})$$

$$t_e = \frac{31.91 - 31.42}{31.42} = 0.01559 \text{ g}$$

$$t_o = \frac{10.83}{31.42} = 0.34468 \text{ g}$$

$$t = \frac{10.83 + \Delta(\text{Peso})}{31.42}$$

$$s = \frac{t - t_e}{t_o - t_e}$$

Tempo (min.)	Tempo (h)	Peso (g)	ΔP	$P_{\text{H}_2\text{O}}$	τ	σ	$\sigma \times 100$
2	0.033	41.18	-3.56	8.66	0.2663	0.6796	67.96
4	0.066	39.65	-5.09	7.13	0.2192	0.5419	54.19
6	0.100	37.11	-7.63	4.59	0.1411	0.3132	31.32
10	0.166	35.66	-9.08	3.14	0.0966	0.1827	18.27
15	0.250	34.95	-9.79	2.43	0.0747	0.1188	11.88
20	0.333	34.55	-10.19	2.03	0.0624	0.0828	8.28
25	0.416	34.38	-10.36	1.86	0.0572	0.0675	6.75
30	0.500	34.28	-10.46	1.76	0.0541	0.0585	5.85
35	0.583	34.15	-10.59	1.63	0.0501	0.0468	4.68
40	0.666	34.10	-10.64	1.58	0.0486	0.0423	4.23
45	0.750	34.09	-10.65	1.57	0.0483	0.0414	4.14
50	0.833	34.04	-10.70	1.52	0.0467	0.0369	3.69
55	0.916	34.03	-10.71	1.51	0.0464	0.0360	3.60
60	1.000	34.00	-10.74	1.48	0.0455	0.0333	3.33
65	1.080	33.96	-10.78	1.44	0.0443	0.0297	2.97
70	1.160	33.96	-10.78	1.44	0.0443	0.0297	2.97

Tabela 11 – tabela experimental referente a vazão 7.

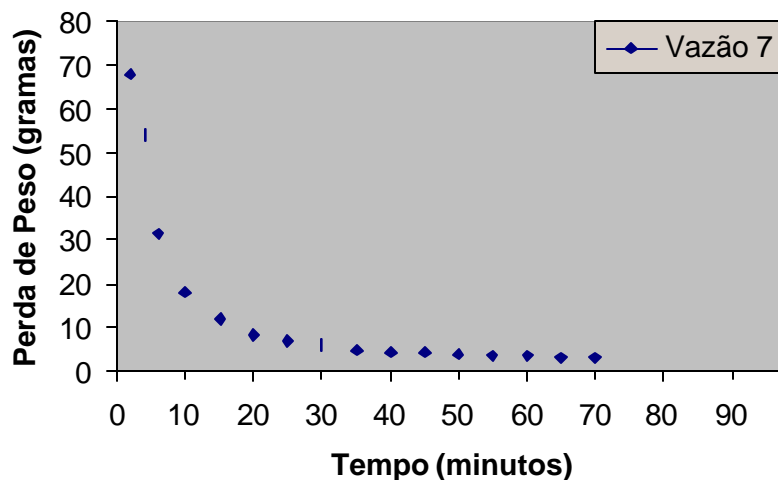


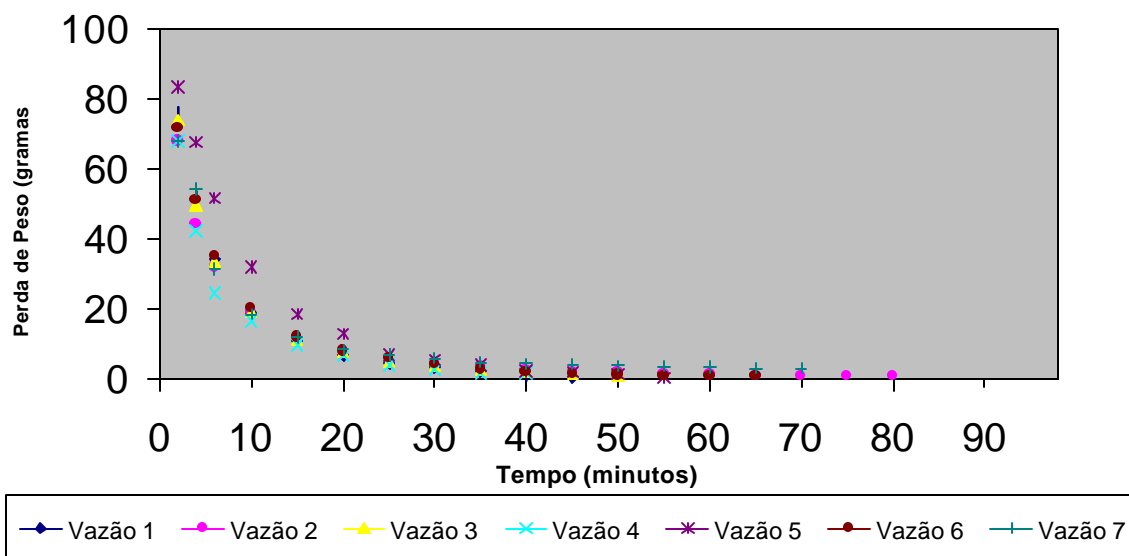
Figura 50 - Perda de peso na secagem sobre influência da vazão 7.

Com as tabelas obtidas, pode ser representada a função $S = f(t)$ sendo que S = (kg de água / kg de sólido seco). Com o qual é representado a porcentagem de umidade do produto em relação ao tempo de secagem, que geram curvas características da quantidade de água que permanece ainda no sólido quando este é submetido a um processo de secagem.

Pode ser observado, que a porção final destes gráficos poderá ser ajustada a uma linha horizontal reta ou com uma inclinação negativa muito suave. Tal fato marca o momento no processo de secagem em que o material já não perde mais água, ou esta perda é realizada de uma forma muito lenta.

A seguir, estão agrupadas todos os resultados obtidos em um único gráfico, para uma visualização global do processo de secagem:

Figura 51 - Representação Gráfica da Perda de Peso na Secagem



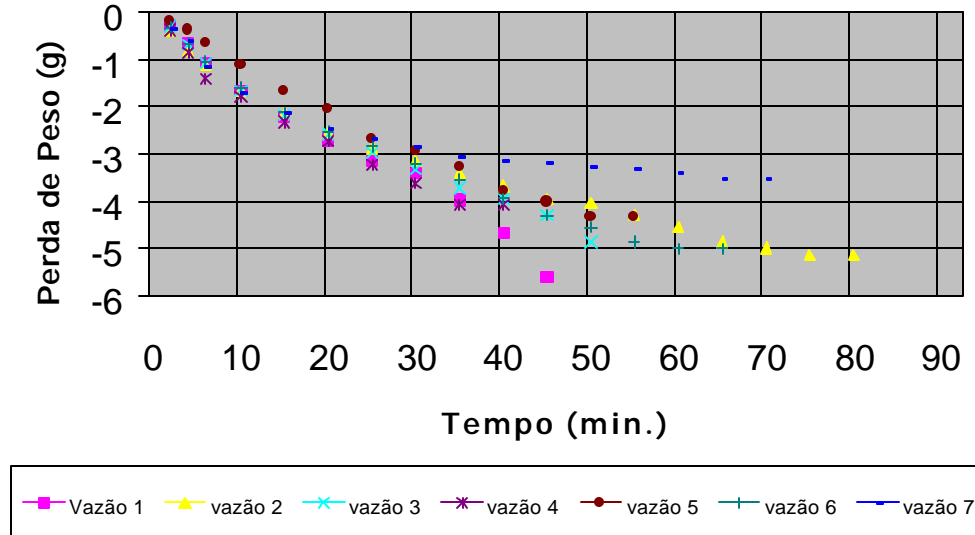
A seguir é demonstrado graficamente o efeito do tempo sobre o logaritmo natural de σ , que representa a quantidade de água que falta eliminar em relação a quantidade total de água que será eliminada durante o processo de secagem.

$$\text{Vazão (x)} = \text{LN} (s_x)$$

Tempo	Vazão 1	Vazão 2	Vazão 3	Vazão 4	Vazão 5	Vazão 6	Vazão 7
2	-0,2762	-0,3867	-0,3026	-0,3873	-0,1827	-0,3332	-0,3863
4	-0,6591	-0,8168	-0,7009	-0,8654	-0,3937	-0,6751	-0,6128
6	-1,0773	-1,1432	-1,0919	-1,4111	-0,6652	-1,0480	-1,1608
10	-1,6662	-1,6663	-1,6580	-1,8031	-1,1430	-1,5961	-1,6998
15	-2,2123	-2,1518	-2,1963	-2,3332	-1,6930	-2,1277	-2,1302
20	-2,7118	-2,5448	-2,5845	-2,7338	-2,0460	-2,5412	-2,4912
25	-3,1458	-2,8788	-2,9709	-3,2302	-2,6894	-2,8536	-2,6955
30	-3,4191	-3,1551	-3,3303	-3,6357	-2,9407	-3,2103	-2,8386
35	-3,9787	-3,4129	-3,7223	-4,0775	-3,2771	-3,5467	-3,0618
40	-4,6719	-3,6812	-3,9455	-4,0775	-3,7880	-3,9522	-3,1629
45	-5,5882	-3,9435	-4,3021		-4,0216	-4,3089	-3,1844
50		-4,0489	-4,8617		-4,3270	-4,5500	-3,2994
55		-4,3002			-4,3270	-4,8685	-3,3241
60		-4,5414				-5,0020	-3,4021
65		-4,8598				-5,0020	-3,5165
70		-4,9933					-3,5165
75		-5,1475					
80		-5,1475					

Tabela 12 – Valores convertidos em $\text{LN } s$ dos ensaios anteriores.

Figura 51a – Representação logarítmica dos valores obtidos na tabela 12.



Desta forma, de acordo com o valor da ordenada na origem de determinado trecho será eleito um modelo geométrico para o material considerado.

Assim, quando os dados experimentais de velocidade de secagem e quantidade de umidade do sólido são representados por uma linha curva e quando não é possível encontrar uma expressão analítica simples que a represente, pode ser empregada a possibilidade de avaliar o fenômeno pelo ponto de vista da difusão não estacionária da água através do material sólido, aplicando a teoria de transporte molecular de matéria em regime não estacionário. Onde é obtida uma equação do tipo:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (117)$$

onde: c = concentração (mol·kg/m³ material)

D = difusividade de massa

que, escrita em função de τ :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (118)$$

A equação (118) não é de aplicação imediata para efeito de desenho de secadores, é necessário realizar a sua integração a fim de lograr uma relação mais direta entre “ τ ” e “ t ”. Deve ser ressaltado que esta equação não pode ser integrada para qualquer tipo de material ou para qualquer tipo de

condição. Pode ser realizada somente para laminas delgadas de espessura finita, com largura e comprimentos infinitos; para cilindros de raio finito e longitude infinita; e para esferas de raio finito, sempre e quando sejam cumpridas as seguintes condições:

$\tau_i \rightarrow$ Umidade do sólido na interface: constante durante a operação.

$\tau_o \rightarrow$ Umidade inicial do sólido: uniforme no início da operação.

$D \rightarrow$ Constante ao longo da operação.

Quando as condições do ar introduzido no secador são constantes, ou seja, umidade absoluta (X), temperatura (T), velocidade mássica e quando durante todo o período, o mecanismo de secagem é o mesmo, (difusão do líquido até a interface) a quantidade de umidade do sólido na interface τ_i , também o será (pois é a umidade de equilíbrio do dito ar τ_o).

A uniformidade de τ_o é mais complicada. Quando o período de velocidade decrescente tenha sido precedido por um período de velocidade constante é muito pouco provável que a quantidade de umidade ao iniciar-se o processo seja uniforme; em contra-partida, quando todo o processo de secagem transcorrer a velocidade decrescente (quando a quantidade inicial de umidade do sólido é baixa), então o sólido terá tido tempo suficiente para equilibrar a umidade em seus pontos internos, e em tal caso, τ_o será uniforme em todo o material ao iniciar-se o processo.

Admitindo agora que a difusividade “D” é constante e tomando um valor médio da mesma para várias quantidades de umidade, a equação (118) pode ser integrada e sua solução será um desenvolvimento em série.

3.3.8 MATERIAL ESFÉRICO

Para o caso de uma esfera de raio finito, a integração da equação (118) nos fornece uma relação entre a umidade pontual “ τ ”, o tempo “ t ” e a distância no interior da esfera “ r ”, da forma:

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = \frac{2R}{pr} \left(\text{sen} \frac{pr}{R} e^{-p^2 \frac{Dt}{R^2}} - \frac{1}{2} \text{sen} \frac{2pr}{R} e^{-\frac{4p^2 Dt}{R^2}} + \dots \right) \quad (119)$$

Como em um laboratório, só é possível medir a umidade absoluta média de todo o material, e para calcular esta a partir da equação (119), se deve integrar.

$$t_m = \frac{\int_0^V t dV}{V} = \frac{\int_0^R t \cdot 4\pi r^2 dr}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{R^3} \int_0^R t \cdot r^2 dr$$

(120)

esta integração conduz à

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = \frac{6}{p^2} \left[\exp\left(\frac{-p^2}{R^2} Dt\right) + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{-4p^2}{R^2} Dt\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-9p^2}{R^2} Dt\right) + \dots \right]$$

(121)

onde R = raio da esfera.

3.3.9 MATERIAL CILÍNDRICO

Se a simetria do corpo considerado é um cilindro, como o esquematizado na figura (52), onde o processo de difusão da água ocorre somente em uma direção, perpendicular ao eixo axial (desprezando o efeitos dos extremos), a solução da equação diferencial (118), com as mesmas condições de contorno adotadas para o caso anterior, conduz a equação:

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = 2 \left[\frac{J_0(z_1 \cdot r / R)}{z_1 J_1(z_1)} e^{-D z_1^2 t / R^2} + \frac{J_0(z_2 \cdot r / R)}{z_2 J_1(z_2)} e^{-D z_2^2 t / R^2} + \dots \right]$$

(122)

onde z1 e z2, são os valores da função de Bessel Jo(z)=0. E J1(z) tem seu correspondente valor numérico de acordo com o sub-índice “1” da função de Bessel e o valor de “z”.

“r” distância ao eixo.

“R” raio do cilindro.

A integração da equação (122) para calcular a concentração média:

$$t_m = \frac{\int_0^R t \cdot 2\pi r \cdot L \cdot dr}{\pi R^2 \cdot L} = \frac{2}{R^2} \int_0^R t \cdot r \cdot dr$$

(123)

conduz a expressão:

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = 4 \cdot \left[\frac{1}{z_1^2} \cdot \exp\left(-D z_1^2 t / R^2\right) + \frac{1}{z_2^2} \cdot \exp\left(-D z_2^2 t / R^2\right) + \dots \right]$$

(124)

Z₁=2.404

Z₃=8.653

Z₅=14.930

Z₇=21.210

Z₉=27.490

$$Z_2=5.520$$

$$Z_4=11.791$$

$$Z_6=18.070$$

$$Z_8=24.350$$

$$Z_{10}=30.630$$

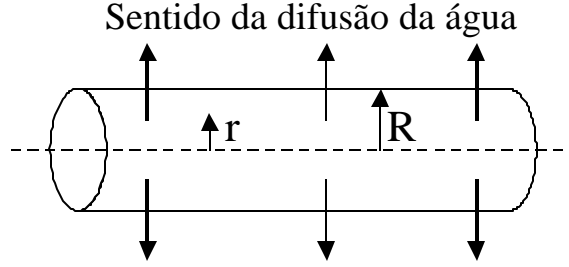


Figura 52 – Corpo cilíndrico onde a difusão da água ocorre somente em uma direção.

3.3.10 MATERIAL PLANO

Para o caso especial, onde o modelo do material é semelhante ao das laminas paralelas com uma espessura de $2L$ (figura 53) e aplicando as mesmas condições de contorno, da equação diferencial (118) se obtém a expressão:

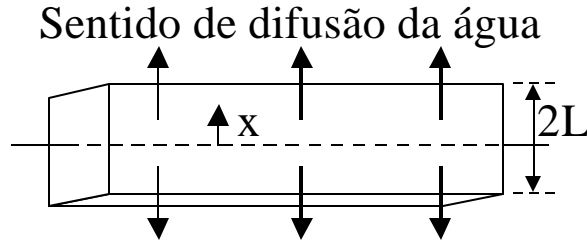


Figura 53 – Representação das laminas paralelas com espessura $2L$.

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = \frac{4}{p} \left[\exp \left(-p^2 Dt / 4L^2 \right) \cos \frac{px}{2L} - \frac{1}{3} \exp \left(-9p^2 Dt / 4L^2 \right) \cos \frac{3px}{2L} + \frac{1}{5} \exp \left(-25p^2 Dt / 4L^2 \right) \cos \frac{5px}{2L} - \dots \right]$$

(125)

e integrando de acordo com:

$$t_{media} = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L t \cdot dx$$

(126)

se obtém:

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = \frac{8}{p^2} \left[e^{-p^2 \cdot Dt / 4L^2} + \frac{1}{9} e^{-9p^2 \cdot Dt / 4L^2} + \frac{1}{25} e^{-25p^2 \cdot Dt / 4L^2} + \dots \right]$$

(127)

Todas estas equações podem ser encontradas no livro “Heat conduction” de Leonard R. Ingersoll, Otto J. Zobel e Nefred C. Ingersoll.

Utilizando a equação correspondente a geometria esférica e lhe denominamos:

$$S = \frac{t - t_e}{t_o - t_e} \quad y = \frac{p^2}{R^2} \cdot Dt \quad (\tau \text{ umidade média do material})$$

então esta equação se transforma em:

$$S = \frac{6}{p^2} e^{-y} + \frac{1}{4} e^{-4y} + \frac{1}{9} e^{-9y} + \dots$$

(128)

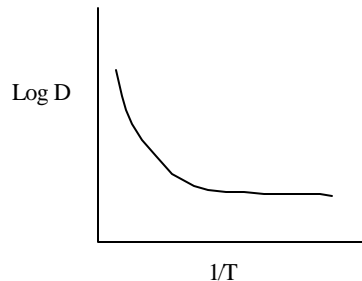
Contando agora com a equação (128) se procede da seguinte maneira: na forma experimental, determinado “ τ_o ” e “ τ_e ” obtém-se o valor de “ σ ” para vários “ τ ”; da equação (128) deduzimos o valor de “ y ” em cada caso, e como os valores de “ R ” e “ t ”, o valor de “ D ” pode ser calculado. Com estes valores pode ser construída uma tabela com a formatação mostrada abaixo.

τ	t	$\sigma = \tau - \tau_e / \tau_o - \tau_e$	y	D
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---

Tem-se observado que os primeiros valores de “ D ” são bastante variáveis, mas quando o processo de secagem já avançou, “ D ” se mantém aproximadamente constante. Destes valores de “ D ” se obtém a média que é adotada como valor “efetivo” da difusividade.

Este ensaio é realizado para várias temperaturas para determinar o valor de “ D ” em cada caso. Com estes valores é traçado um gráfico como o representado na figura 54, que responde a equação:

$$D = D_o \cdot e^{-A/T}$$



(129)

Figura 54 – Forma da representação gráfica referente a equação (129).

Desta forma, conhecendo a difusividade e por aplicação da equação (121), pode ser determinado o tempo de secagem “b” que é necessário para obter uma quantidade “t_f” de umidade, em um material que cumpra as condições estipuladas anteriormente.

Em vista das equações (121), (124) e (127) da parte teórica apresentada anteriormente, torna necessário uma explicação sobre o trecho reto que aparece na figura 54. Desta forma é realizada uma tentativa de linearizar estas três equações.

Para o modelo esférico:

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = \frac{6}{p^2} \left[\exp\left(\frac{-p^2}{R^2} Dt\right) + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{-4p^2}{R^2} Dt\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-9p^2}{R^2} Dt\right) + \dots \right]$$

sendo:

$$S = \frac{t - t_e}{t_o - t_e} \quad y = \frac{p^2}{R^2} \cdot Dt$$

Eliminando o primeiro termo do desenvolvimento e aplicando o logaritmo em ambos os lados, é buscada a linearização da equação:

$$LNS = -Y + LN\left(\frac{6}{p^2}\right) \quad (13)$$

0)

Com o qual é obtida uma reta onde aparece a expressão “Y” em relação as variáveis “e”, “D” e “t”; mas como todos os ensaios foram realizados para valores idênticos de “e” e “D”, então só dependerá do tempo de secagem. Para esta equação a inclinação é 1 e a ordenada de origem será: $LN(6/p^2) = -0.4977$;

Para o modelo cilíndrico:

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = 4 \left[\frac{1}{z_1^2} \cdot \exp\left(-Dtz_1^2 / R^2\right) + \frac{1}{z_2^2} \cdot \exp\left(-Dtz_2^2 / R^2\right) + \dots \right]$$

$$LNS = LN4 + LN\left(\frac{1}{2.404}\right) - 2.404^2 \times y = -2.404^2 \times y + LN\left(\frac{4}{2.404^2}\right) \quad (131)$$

$$\text{onde } y = D \times t / R^2 \text{ e } S = \frac{t - t_e}{t_o - t_e}$$

e a ordenada na origem será: $LN\left(4 \times \frac{1}{2.404^2}\right) = -0.3679$

Para o modelo plano:

$$\frac{t - t_e}{t_o - t_e} = \frac{8}{p^2} \left[e^{-p^2 \cdot Dt / 4L^2} + \frac{1}{9} e^{-9p^2 \cdot Dt / 4L^2} + \frac{1}{25} e^{-25p^2 \cdot Dt / 4L^2} + \dots \right]$$

$$LN s = LN(8/p^2) - p^2/4 \times y$$

(132)

onde $y = D \times t / L^2$ e $s = \frac{t - t_e}{t_o - t_e}$

e a ordenada na origem será: $LN(8/p^2) = -0.21$

A seguir é realizada uma comparação entre as ordenadas nas origens dos três modelos com as ordenadas correspondentes nos gráficos, onde será possível determinar o modelo que mais se aproxima dos gráficos.

Nos gráficos aparecem as seguintes ordenadas na origem:

Vazão 1 → -0.53

Vazão 2 → -1.14

Vazão 3 → -1.06

Vazão 4 → -0.90

Vazão 5 → -0.91

Vazão 6 → -0.98

Vazão 7 → -1.24

Tabela 13 – Ordenadas na origem nos respectivos gráficos.

Portanto o modelo que mais se aproxima é o modelo cilíndrico, seguido do modelo plano e por último o modelo esférico.

Desta forma, é possível implementar a tabela T; $1/T$; inclinação; D/L^2 , já que em função do gráfico pode ser obtida a inclinação de cada uma das curvas, e levando em conta a equação para o modelo cilíndrico:

$$LN s = LN 4 + LN\left(\frac{1}{2.404}\right) - 2.404^2 \times y = -2.404^2 \times y + LN\left(\frac{4}{2.404^2}\right)$$

(133)

$$\text{onde } y = D \times t / R^2 \text{ e } s = \frac{t - t_e}{t_o - t_e}$$

e a inclinação corresponderá a expressão: $-2.404^2 \times D/R^2$ e consequentemente pode ser isolado o valor de D/R^2 , que será:

$$D/R^2 = \text{inclinação} / -2.404$$

(134)

Assim, o valor da inclinação para cada uma das amostras é:

Vazão 1	→	-6.480
Vazão 2	→	-3.940
Vazão 3	→	-4.430
Vazão 4	→	-5.503
Vazão 5	→	-4.166
Vazão 6	→	-4.513
Vazão 7	→	-3.386

Aplicando estes valores na equação (134), podem ser calculados os valores de D/R^2 e estabelecer uma nova tabela.

Vazão	T	Inclinação	D/R^2
1	63	-6.480	2.6965
2	63	-3.940	1.639
3	63	-4.430	1.843
4	63	-5.503	2.289
5	40	-4.166	1.733
6	50	-4.513	1.877
7	70	-3.386	1.408

Com estes dados é possível realizar uma análise sobre a função “σ”, que representa a porcentagem de água a ser eliminada em relação a quantidade total que pode ser eliminada durante o processo de secagem de determinado material.

Ressalta-se neste ponto a grande divergência que existe entre a ordenada de origem do modelo teórico e a ordenada experimental. Quando é utilizado o modelo cilíndrico como sendo o que descreve o ensaio de secagem em laboratório, então os erros produzidos são:

Vazão	Valor	Erro (%)
1	-0.53	44
2	-1.14	210

3	-1.06	188
4	-0.90	145
5	-0.91	147
6	-0.98	167
7	-1.24	237

Pode ser que o modelo teórico tenha por missão unicamente determinar o modelo que mais se aproxime do ensaio experimental. Mas o fato da ordenada na origem experimental não coincidir com a teórica não significa necessariamente que o processo realizado no laboratório não se ajuste ao modelo. Este aspecto seria determinado pelas inclinações, as quais poderão ser ajustadas.

Modelo Cilíndrico

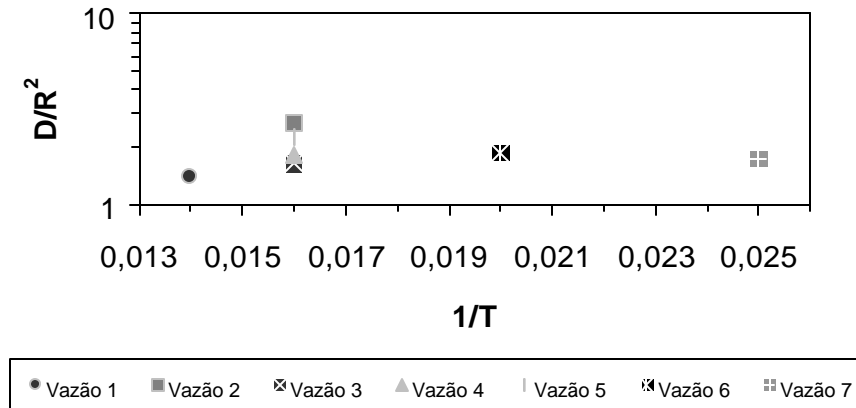


Figura 55 – Representação do LN (D/R²) em relação a 1/T.

Estas últimas representações foram realizadas com o objetivo de obter a equação:

$$\frac{D}{R^2} = A \times \exp(-e/T)$$

(155)

No caso da figura 55 exposta anteriormente, onde estão representadas quatro temperaturas de trabalho que se relacionam com $q_G = 0.495 \text{ m}^3/\text{h}$, que comparado com a equação (134) levam a dedução de que o valor de “e” assim como o de “A”. Para isto, esta equação deve ser linearizada.

$$\text{Log} \frac{D}{R^2} = \text{Log}(A) - e \times \frac{1}{T}$$

(136)

Comparando com a figura 55, anteriormente mencionada, obtém-se que:

$$\text{Log } \frac{D}{R^2} = 1.175 + 1.691 \times \frac{1}{T} \Rightarrow \begin{cases} A = 1.175 \\ e = -1.691 \end{cases}$$

(137)

Neste ponto do ensaio é feita uma análise dos resultados obtidos. Observando a bibliografia e levando em consideração que as curvas obtidas foram linearizadas com o objetivo de determinar as suas inclinações e as suas ordenadas na origem para tempos médios. Por tratar-se de um material de elevada umidade, a velocidade de difusão constante era alcançada praticamente no início do ensaio (com cinco minutos já se poderia alcançar a velocidade de difusão constante).

Outro aspecto a ser considerado é o fato de que a velocidade de difusão constante não dura muito tempo.

Esta velocidade de difusão constante começa a baixar de valor (com aproximadamente trinta minutos de ensaio), dando origem a terceira etapa de secagem. Em realidade o modelo é aplicável somente a esta etapa de secagem, quando já esta superada a velocidade crítica de secagem.

Em função disto, os gráficos onde aparecem as retas na qual são calculadas as inclinações devem ser refeitos, assim como devem também serem recalculadas as ordenadas.

Com uma breve observada nos gráficos se aprecia a dificuldade que existe em delimitar qual é o início e fim da velocidade constante. Tal dificuldade reside no fato de ser impossível estabelecer valores altos de vazão de ar. Fazendo com que o coeficiente de difusão não seja independente da vazão de circulação, assim como o efeito da temperatura de circulação do ar não exerça a influência decisiva que era esperada. A seguir serão expostos os gráficos onde foram considerados os pontos acima abordados. Para tal, foram eliminados os pontos inúteis e sofreram ampliações, em razão do qual talvez tenham pouca semelhança, mas foram da mesma forma ajustadas por mínimos quadrados.

Assim, ajustando os pontos a uma reta, se extrai a inclinação e a sua ordenada na origem:

Vazão	T	Inclinação	Origem
1	63	-6.925	-0.446
2	63	-9.425	-0.142
3	63	-8.010	-0.240
4	63	-8.619	-0.290
5	40	-5.784	-0.163
6	50	-6.170	-0.437
7	70	-7.890	-0.251

Neste caso o modelo escolhido estará entre o plano e o cilíndrico. Recordando que para o modelo plano inclinação = $(-\pi^2/4).(D/L^2)$, e para modelo cilíndrico a inclinação = $-2.404^2 \times (D/R^2)$. Como o modelo plano é o que predomina, sobre ele recaiu a escolha.

Vazão	T	Inclinação	$D/L^2; D/R^2$
1	63	-6.925	2.807
2	63	-9.425	3.820
3	63	-8.010	3.246
4	63	-8.619	3.493
5	40	-5.784	2.344
6	50	-6.170	2.501
7	70	-7.890	3.198

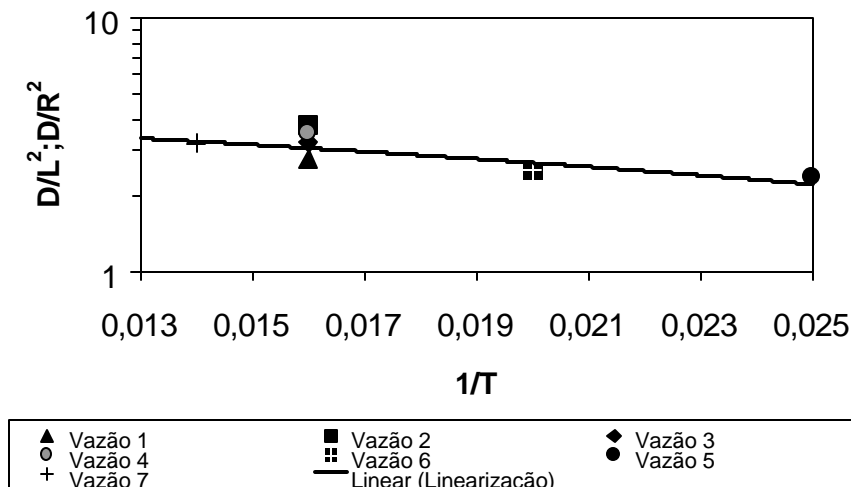


Figura 56 – Representação do Log ($D/L^2; D/R^2$) em relação a variável $1/T$

Na figura 56 é realizada a representação do Log ($D/L^2; D/R^2$) em relação a variável $1/T$. Estas últimas representações foram realizadas com o objetivo de obter a equação:

$$D/L^2 = A \times \exp(-e/T)$$

(138)

Utilizando o último gráfico (figura 56) exposto, onde estão plotadas as três temperaturas de trabalho que correspondem a um $q_G = 0.447 \text{ m}^3/\text{h}$, relacionando-o com a equação (138), podem ser deduzidos os valores de “e” e de “A”. Mas para isto é necessário linearizar a equação, aplicando logaritmo em ambas as partes:

$$\text{Log}(D/L^2) = \text{Log}(A) - e \times 1/T = 1.556 - 29.31 \times 1/T$$

(139)

onde, $A = 1.556$; $e = +29.31$

3.3.11 COMPROVAÇÃO DOS RESULTADOS:

Nesta última etapa é verificado se as equações empregadas reproduzem ou representam o fenômeno físico da secagem. Normalmente esta comprovação deve ser realizada na parte final das investigações.

A partir da equação (130), correspondente ao modelo geométrico eleito (equações 121, 124 ou 127). Ou seja, a partir do valor de D/L^2 correspondente a uma temperatura (temperatura eleita = 70 °C), deduzir s para os mesmos tempos em que foram realizadas as pesagens.

Empregando estes novos fatores na equação (139) é obtido o valor de 7.2035 para D/L^2 , que deve ser substituído na equação correspondente ao modelo teórico plano:

$$LN(s) = LN\left(\frac{8}{p^2}\right) - \frac{p^2}{4y} = -0.21 - 17.7739 \times t \quad (140)$$

Na equação (140) serão substituídos os mesmos valores de tempo empregados nos ensaios. Tal fato tem como base a obtenção de uma tabela que servirá como fonte de comparação entre os valores teóricos e os obtidos nos ensaios realizados em laboratório:

t	LNS
0.033	-0.77793
0.066	-1.38300
0.100	-1.98739
0.166	-3.16046
0.250	-4.65347
0.333	-6.12871
0.416	-7.60390
0.500	-9.09690
---	---
---	---

Tabela 14 – Representação teórica dos valores de “t” × “s”

Demonstrando com muita clareza que os resultados teóricos se distanciam muito dos valores experimentais, e esta tendência tende a aumentar com o tempo.

A tentativa de compatibilizar tanto na ordenada, na origem, como na inclinação os valores obtidos na prática com a teoria foi um fracasso. Demonstrando que os trechos corretos à serem linearizados não eram os correspondentes aos trechos iniciais como foi adotado no ensaio, mas sim os trechos médios tal como foi suposto no início do ensaio. O que nos leva a realizar uma nova comparação dos resultados, mas baseando-a na primeira suposição

Observando os dados originais da Tabela 13, pode ser verificado que existe uma discordância em relação aos valores de inclinação, e por conseguinte para o valor de D/L^2 , para a

temperatura de 70 °C em relação aos valores para as temperaturas de 50 °C e 40 °C. Tal fato pode ter -se originado no cálculo da inclinação para o trecho médio, uma vez que este é de difícil delimitação.

O que nos induz a recalcular utilizando uma reta que passe unicamente pelas duas primeiras temperaturas, para logo realizar a comprovação utilizando a última temperatura (70°C). Isto exige uma maior precisão, uma vez que o ajuste é realizado somente por dois pontos; mas ao mesmo tempo que a comprovação nos resultava positiva, nos demonstraria que:

- o modelo cilíndrico escolhido seria o mais correto;
- a única informação que nos reporta a ordenada na origem experimental é qual dos modelos teóricos que se aproxima do processo de secagem ensaiado, sem considerar o desvio que a ordenada experimental tenha sobre a teórica;
- efetivamente a inclinação correspondente a temperatura de 70°C estava equivocada em função da dificuldade de delimitar o trecho reto da curva;
- efetivamente os trechos onde a velocidade de secagem é constante são determinados pelos trechos médios das curvas.

Por tanto, deve ser realizado um processo similar ao que já foi feito, mas utilizando o modelo cilíndrico e fazendo uso apenas das primeiras temperaturas. Ao utilizar a equação (138), que deve ser linearizada pelo mesmo processo que já foi descrito, obtêm-se:

$$\text{Log}\left(\frac{D}{L^2}\right) = \text{Log}(A) - e \times 1/T \quad (141)$$

Realizando um ajuste pelo método dos mínimos quadrados para as temperaturas de 40 °C e 50 °C, e considerando os valores obtidos na tabela 13 ou utilizando o gráfico de $\text{Log}(D/R^2)$ em relação a $1/T$:

Amostra	T	Inclinação	D/R^2
1	63	-6.480	2.6955
2	63	-3.940	1.6389
3	63	-4.430	1.8427
4	63	-5.503	2.2891
5	40	-4.166	1.7329
6	50	-4.513	1.8772
7	70	-3.386	1.4084

De onde é obtido os valores para:

$$\text{Origem} = 3.133330$$

$$\text{Inclinação} = -808.640$$

Aplicando a equação do modelo cilíndrico (equação 133) para calcular o valor de D/R^2 correspondente a temperatura de 70 °C, uma vez que este valor não foi utilizado no ajuste. Este valor é

substituído na equação do modelo teórico cilíndrico para ser comparado com os valores obtidos experimentalmente. Na tabela 15 estão expostos os resultados.

t (h)	Ln s (experimental)	Ln s (teórico)
0.033	-0.385	-0.515
0.060	-0.612	-0.636
0.100	-1.161	-0.817
0.166	-1.698	-1.112
0.250	-2.128	-1.490
0.333	-2.488	-1.870
0.416	-2.688	-2.240
0.500	-2.830	-2.610
0.583	-3.070	-2.990
0.666	-3.170	-3.320
0.750	-3.194	-3.730
0.833	-3.296	-4.102
0.916	-3.324	-4.474
1.000	-3.411	-4.851
1.080	-3.520	-5.209

Tabela 15 - Comparação entre os valores teórico e experimental para o modelo cilíndrico.

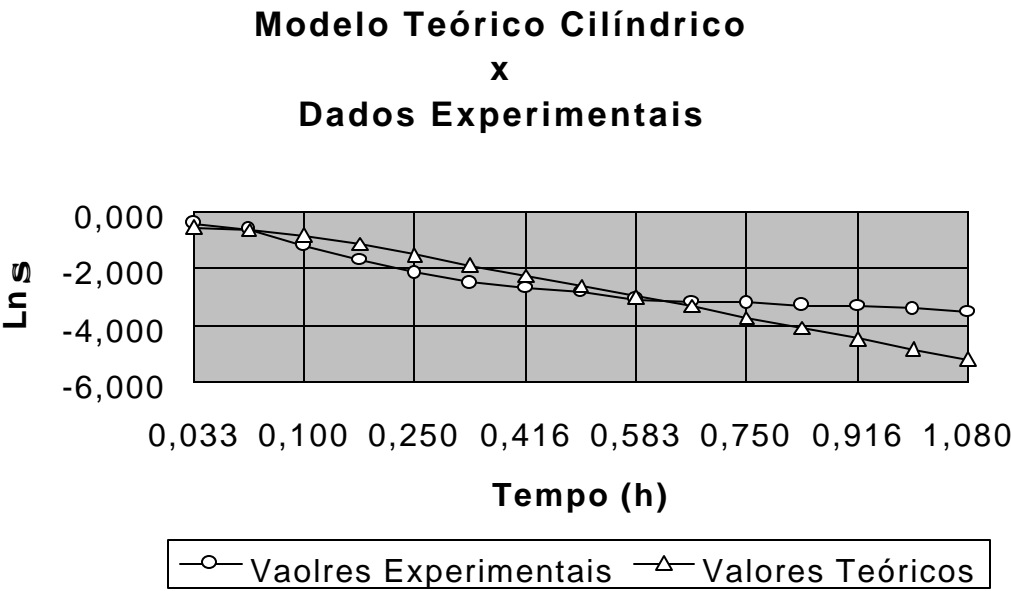


Figura 57 – Gráfico para a temperatura de 70 °C (experimental e teórico)

Demonstrando desta forma que, para pequenos ou grandes espaços de tempos o ajuste não é perfeito, ainda que mantenha uma tendência. Em contra partida, para espaços de tempos intermediários que correspondem a uma velocidade de difusão constante, o ajuste é relativamente aceitável, levando em consideração as grandes deficiências do equipamento que conduzem a numerosos erros e a falsas condições de trabalho.

CAPÍTULO 4 – SISTEMAS DE CONTROLE

As técnicas de controle automático, possuem um campo ilimitado de aplicação, similarmente ao que ocorre na informática e no cálculo automático. Então, o ato de aplicar estas técnicas em processos de qualquer natureza, e a possibilidade de contar ainda com, sistemas capazes de manter todos os parâmetros dentro de uma faixa de valores ou dentro de um regime de variação normal ou tolerável sem a intervenção humana, é intrinsecamente útil. Além disto, é possível otimizar a evolução do processo, então já não se pode mais falar unicamente da utilidade, mas sim de um avanço tecnológico, uma vez que em uma infinidade de ocasiões nem a intervenção humana obteria os mesmos resultados. Isto ocorre geralmente em situações de elevada complexidade, ou que devam ser operadas com um tempo de resposta curto. Ambos os casos podem superar amplamente a capacidade humana. Considera-se ainda que, estes sistemas eliminam as falhas por distração, cansaço, tensão ou qualquer condicionamento que poderia alterar o correto funcionamento ou a tomada de decisão.

Um sistema pode ser físico, lógico ou conceitual, o certo é que a teoria clássica de controle exige um conhecimento profundo dos seus processos e das suas respostas a diferentes estímulos, o que nem sempre é possível. É neste ponto onde a lógica difusa exerce um papel fundamental, pois admite tratar uma informação imprecisa, sem que por isto seja obtida uma solução menos robusta ou menos confiável do que a do controle clássico. Ao contrário, normalmente acontece precisamente o oposto.

Levando em consideração a importância dos sistemas de controle e, sabedores de que estes sistemas ao empregarem à lógica “Fuzzy” forneceram soluções mais simples, eficazes e com grande facilidade de serem colocados em prática. Desta forma o controle baseado em lógica difusa constitui uma das áreas de aplicação mais importantes desta lógica. Como também pode ser dito que, o controle é o fator principal que impulsionou a criação dos sistemas difusos que, tanto a nível de hardware como de software, estão disponíveis na atualidade.

4.1 SISTEMAS CLÁSSICOS DE CONTROLE

A teoria clássica de controle cobre uma grande quantidade de aspectos e metodologias. Não obstante, em um primeiro resumo, é possível determinar alguns elementos comuns a todos eles.

Como primeiro ponto deve ser ressaltada a diferença entre os controladores realimentados e os não realimentados. Os não realimentados consistem essencialmente em gerar seqüências de instruções como resposta à diferentes ordens de entrada. Deve ser ressaltado que um controlador deste tipo aceita condicionantes dependentes da parte controlada (por exemplo, “se é negativo então A, se é positivo ou zero então B”), e desta forma o sistema já inclui uma realimentação.

Um sistema realimentado é aquele que está configurado como em um cacho (ou vários), de maneira que seja possível modificar a excitação de entrada como função do efeito que está sendo produzido (situação de saída). Por exemplo, quando é controlada a velocidade de um veículo, a realimentação da informação é proporcionada pelo velocímetro, para modificar convenientemente o deslocamento do acelerador.

Um sistema realimentado de controle pode ser representado pelo esquema da figura 58. Nesta figura, o sinal de entrada é um sinal de referência. A saída do sistema é avaliada por um sensor, e o resultado é comparado com o sinal de entrada. E esta diferença é denominada de “sinal de erro”. Quando o erro for zero, o processo a controlar não recebe nenhum sinal e, como consequência, sua saída permanece com o mesmo valor. Quando o erro for diferente de zero, este causará uma resposta do processo, que têm o objetivo de reduzir a magnitude do erro até que seja alcançada a situação de equilíbrio. Quando é modificada a entrada, o erro deverá ser incrementado, causando, uma vez que a referência foi alterada, uma situação de equilíbrio distinta. O compensador é um filtro para o sinal de erro, já que normalmente a resposta do sistema não é ótima quando o erro é aplicado diretamente ao processo.

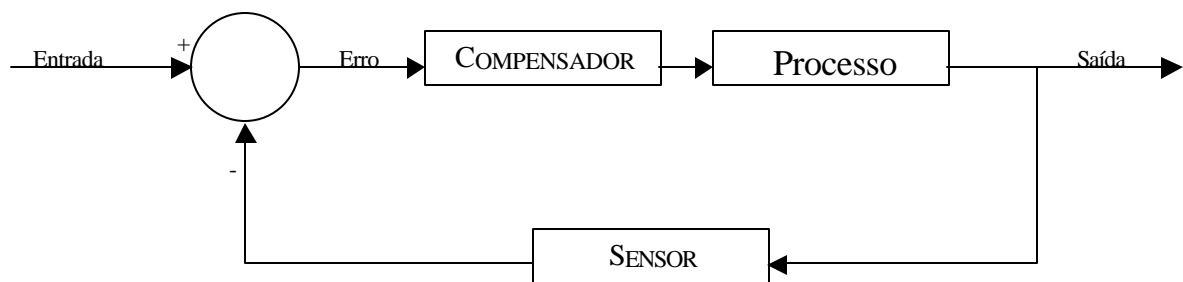


Figura 58 – Esquema básico de um sistema de controle realimentado.

Estes podem ser subdivididos em dois tipos, aqueles cuja função é manter constante uma variável (reguladores) e os que fazem uma variável acompanhar uma determinada função de tempo (servo-mecanismos). Desta forma, um termostato é um regulador, enquanto que o controle da mão de um robô é um servo mecanismo (deslocamento em uma trajetória).

Na figura 58 pode ser observado que um dos blocos que participa do fluxo de realimentação é um compensador. Este bloco é essencial para a resposta do sistema, pois possui a função de filtrar o sinal de erro, com o objetivo de satisfazer determinados padrões de funcionamento. Estes padrões, que necessitam de um modelo bastante preciso da resposta do sistema, podem ser: as características dos transistores, a eliminação das perturbações, a sensibilidade em relação as flutuações dos parâmetros de processo, etc....

Dentro da arquitetura geral do controlador representado na figura 58, podem ser avaliadas diferentes formas de implementação. Mas o objetivo principal é o de avaliar a implementação do controle analógico e do digital. Dentro do controle digital existem os que são realizados por computadores ou processadores de propósito geral (software) e os que são realizados por sistemas digitais específicos. Na figura 59 pode ser observado um esquema geral de um controlador digital, no qual os sinais analógicos são transformados em digitais (bloco A/D) para serem tratados deste modo e, uma vez processados, voltam a passar de digital para analógico (bloco D/A) de forma que possam ser incorporados normalmente ao processo.

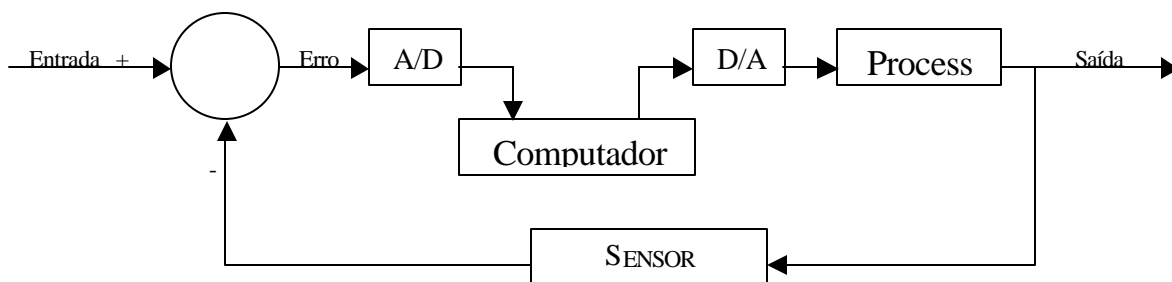


Figura 59 – Esquema geral de um Controlador digital.

4.2 SISTEMAS DE CONTROLE DIFUSOS

Quando se observa o modo de atuar de uma pessoa que realiza uma tarefa de controle, fica claro uma forte componente de falta de atenção e de incerteza em suas ações. Supondo que, por exemplo, uma pessoa ao conduzir um veículo em um determinado trecho reto de uma estrada, tem por objetivo não desviar a trajetória. Porém o ângulo de posicionamento do volante é alterado constantemente, para adaptar-se a trajetória. Considerando por outro lado, um operador de uma planta industrial que recebe a ordem de abrir “um pouco” determinada válvula manual. Somente a experiência deste operador fará com que esta operação seja executada corretamente, ainda que em outras ocasiões frente a

mesma ordem, não a tenha posicionado da mesma forma. Um terceiro exemplo pode ser a temperatura de um recinto, que pode oscilar para cima ou para baixo dos valores desejados, sem que esta diferença seja notada. Porém, quando esta variação é grande, devem ser adotadas medidas adequadas, como por exemplo abrir um pouco a janela, regular a calefação, etc. Nestes exemplos e em muitos outros o resultado é aceitável, mesmo que não tenham sido tomadas as ações.

A solução tradicional para estes tipos de problemas são os controladores baseados em modelos matemáticos, que implicam na resolução de cálculos mais ou menos complexos afim de obter uma ação de controle precisa. Contudo, uma pessoa não segue um modelo matemático em sua forma de raciocinar para realizar uma ação similar; não necessita resolver equações nem cálculos complexos. Apesar de atualmente não se conhecer o suficiente sobre os processos mentais de uma pessoa para determinar o seu funcionamento, mas as suas manifestações são conhecidas e estas servem de base para a sua avaliação. Ressalta-se ainda que, o principal modo de expressar o conhecimento é a linguagem, que não só é um veículo de idéias, como também pode ser qualificada como uma “ferramenta de pensar” ao poder expressar como são tomadas as decisões. Na linguagem está fundamentada a aprendizagem, e por tanto é uma boa referência para nossos propósitos de estudar o comportamento humano em tarefas de controle.

As expressões comumente empregadas no intento de descrever uma determinada tarefa de controle estão na forma de condições ou regras que descrevem o que fazer em uma determinada situação. Desta forma, é necessário o agrupamento de regras suficientes para contemplar todas as situações possíveis de controle, com o objetivo de definir muito bem as regras que constituirão o controlador. Alguns exemplos destas regras podem ser:

“Se o ângulo de inclinação é nulo, então não fazer nada”.

“Se a pressão é alta, diminuir um pouco o regime do motor”.

“Se a pressão é muito alta, diminuir muito o regime do motor”.

Desta forma é possível avaliar como são vagas as instruções empregadas; por exemplo como é possível quantificar o “Quanto é alta?”. Deve ser ressaltado que: todos os dias muitas pessoas utilizam este tipo de instrução para manejar aparelhos e mecanismos de forma satisfatória; e que ao processo não é necessário agregar mais precisão ao processo, uma vez que este tipo de procedimento aumenta o seu custo final. Alguns textos introdutórios sobre este assunto podem ser encontrados no livro publicado pela Empresa OMRON S.A. (1991).

4.2.1 A LÓGICA DIFUSA APLICADA AO CONTROLE

Basicamente, o controle difuso consiste em representar o comportamento do controlador com regras condicionantes da lingüística, instrumentando as mesmas com uma realização física adequada às restrições do sistema.

Uma regra lingüística é identificada como uma inferência difusa, de maneira que se é cumprida a condição “antecedente” então é realizada a ação conseqüente:

SE condição ENTÃO ação.

Mas na realidade não apresentadas situações ideais e os antecedentes são realizados em maior ou menor grau, o que faz com que a ação à tomar leve em consideração este grau de comprometimento. Quando, além de existirem várias regras para uma mesma ação, a ação definitiva é composta pela participação de todas as regras, cada uma delas com o seu peso correspondente ao seu comprometimento. Este modo de operar é análogo ao comportamento humano frente a determinadas situações. Uma decisão é tomada levando-se em consideração os prós e os contras, de maneira que cada uma delas isoladamente indicaria uma decisão diferente.

Através de um exemplo simples, será possível avaliar o que foi descrito até este ponto. Assim, quando necessitamos controlar a umidade de um pó atomizado em uma indústria cerâmica, que é uma função do grau de umidade entre duas medições. Serão usadas somente duas regras:

- ✓ SE umidade é pequena ENTÃO reduzir a temperatura de entrada dos gases de secagem.
- ✓ SE umidade é grande ENTÃO aumentar a temperatura de entrada dos gases de secagem.

Assim, quando em um determinado momento o valor da umidade é médio, de tal forma que não são cumpridas totalmente nenhuma das duas regras. A decisão sobre a ação será dada pela participação de ambas regras na escala de temperaturas de entrada dos gases de secagem, cujo resultado será um valor intermediário entre reduzir e aumentar, definindo portanto a ação mais adequada (ver figura 62). Se é necessário uma maior estabilidade no sistema real, este pode ser acrescido de uma terceira regra, que cobre o caso proposto:

- ✓ SE umidade é média ENTÃO manter temperatura de entrada dos gases de secagem.

Para avaliar o funcionamento deste mecanismo de inferência, devem ser identificadas várias partes. Além da antecedente e da conseqüente, é necessário avaliar o peso da regra em relação ao primeiro. Esta avaliação é dada pelo grau de adequação da variável “umidade” ao valor “médio”, grau obtido pela operação de ambas. Se existir mais de um antecedente, todos devem ser combinados com o objetivo de obter um único peso da regra. Tal peso afetará ao conseqüente ponderado e sua influência na decisão final.

4.2.2 ETAPA DE ANTECEDENTES

Em geral, a parte esquerda da regra contará com vários antecedentes unidos por uma conexão “E”, que espelha a existência de várias condições para realizar uma ação:

SE condição1 E condição2 E ENTÃO ação

Cada condição é representada por uma variável e uma etiqueta lingüística. Por exemplo:

Umidade é GRANDE

A variável (umidade) corresponde a um parâmetro do sistema que variará durante o funcionamento e a etiqueta (GRANDE) é um conjunto difuso no domínio da variável.

A forma mais comum de representar estes elementos, é a representação de suas funções de pertinência sobre eixos cartesianos (figura 60). A etiqueta GRANDE desta mesma figura pode ser representada como um trapézio centralizado sobre os valores de umidades grandes. Dependendo das características do sistema à realizar, devem ser eleitos convenientemente os suportes físicos das etiquetas. Os domínios de definição (eixo X) estão associados em geral ao dispositivo físico de medida correspondente. Assim, os valores medidos em cada momento são transformados na magnitude (tensão, corrente, etc.) e escala de representação adequadas para seu processamento, de acordo com o dispositivo encarregado de processar o antecedente.

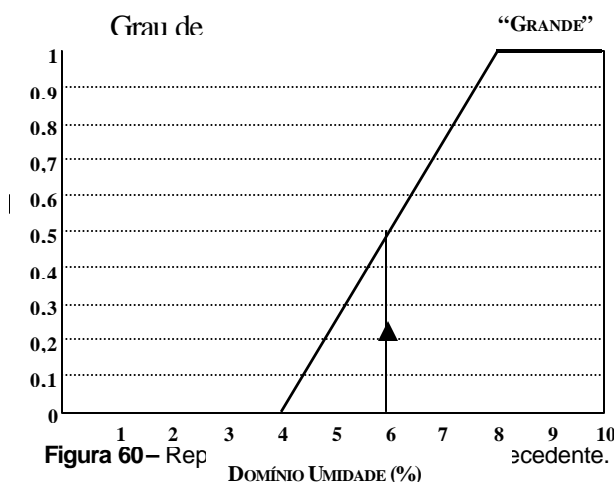


Figura 60 – Rep

DOMÍNIO UMIDADE (%)

Em um dado momento, a umidade é de 6%, valor do domínio indicado no eixo X. A seguir é calculada a sua pertinência no conjunto das “grandes umidades”. Quanto está GRANDE com 6% de umidade? A resposta é que 6% não é uma umidade totalmente grande, mas tão pouco deixa de ser. Obtemos um grau de compatibilidade ou cumprimento do

antecedente (entre 0 e 1), que é o peso ao ser levado em conta na tomada da decisão correspondente. É interpretado o verbo “É” do antecedente com a pertinência ao conjunto difuso definido pela etiqueta.

A variável também pode ser dada por um conjunto difuso completo (ver figura 61). Neste caso é uma função piramidal, que pode ser interpretada como: o valor continua sendo 6%, mas é uma medida realizada com um instrumento que comete erros. Desta forma, o valor autêntico pode estar acima ou abaixo de 6%, o que é representado por uma variação nos flancos da pirâmide. Neste caso a compatibilidade é calculada pela interseção das duas funções, cujo valor máximo é o grau em que ele cumpre o antecedente. A representação trapezoidal de conjuntos difusos favorece inclusive outros modos de “desenhar” a variável, como aplinar a parte superior para representar intervalos de medidas, ou alargar de forma assimétrica os lados para diferentes erros de medida, por excesso ou por defeito, etc.

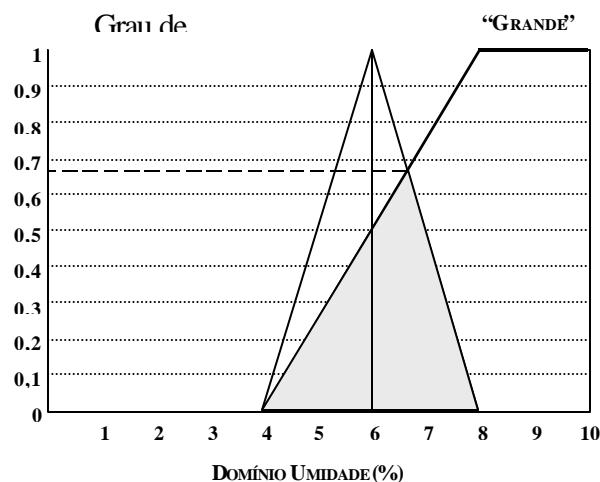


Figura 61 – Antecedente como variável piramidal.

Concluindo assim que, o processo de um antecedente é tomar dados do mundo real e obter graus de pertinência com conjuntos difusos. O operador “E” entre antecedentes é realizado pela aplicação de lógica difusa, que define a conjugação como uma função T-normal. Entre as múltiplas T-normais que existem, a que têm obtido o maior êxito em aplicações de controle, em função de sua simplicidade e facilidade de realização, é a operação “mínimo”. Que trata de calcular o mínimo entre os graus de compatibilidade dos antecedentes unidos por “E”, o que faz muito sentido, pois é calculado o peso que deve ser dado à ação da parte direita da regra, e esta não pode ser maior do que o mínimo dos antecedentes. Ou seja, o peso da regra é uma função da importância que a damos em relação a outras que também podem competir na realização de uma ação.

4.2.3 PONDERAÇÃO DE REGRAS

Até este momento foi abordado o tratamento dos antecedentes, para o qual foi considerada uma só regra em jogo. Mas, é comum em controles, encontrar várias regras que indicam ações diferentes sobre uma mesma variável de saída. O mecanismo de ponderação das regras corresponde à etapa de consequência, mas é interessante considerar previamente como se estrutura o conhecimento (controle) na forma de regras.

Quando existem poucos antecedentes na parte esquerda da regra, uma representação adequada é a forma tabular. Supondo as regras do tipo:

se E é ZE e E' é PP então ACC é NP

onde E = variável erro, E' = troca de erro, ACC = ação sobre o erro, e as etiquetas possíveis são: NG = negativo grande, NP = negativo pequeno, ZE = zero, PP = positivo pequeno, PG = positivo grande.

Na tabela 16, são especificadas 9 regras das 25 possíveis. A regra representada acima corresponde à casa 14.

		E'				
		NG	NP	ZE	PP	PG
E	NG	1	2	3	4	5
	NP	6	7	8 PP	9 ZE	10
	ZE	11 PG	12 PP	13 ZE	14 NP	15 NG
	PP	16	17 ZE	18 NP	19	20
	PG	21	22	23	24	25

Tabela 16 – Tabela de regras

As tabelas representam todas as combinações que podem ser tomadas pelos antecedentes, e são preenchidas pelas ações correspondentes a cada caso. O caso mais simples é o com dois antecedentes, com os quais obtemos uma tabela de 2 dimensões, com 3 teremos uma matriz de 3 dimensões, e assim por diante.

Os valores que preenchem as tabelas são intuitivos e são definidos pelo método da prova e erro, com os quais as tabelas se convertem em uma ferramenta de projeto. Nem sempre estão completas, ainda que em muitos casos, agregar regras em redundância melhora a estabilidade ou o rendimento do controlador.

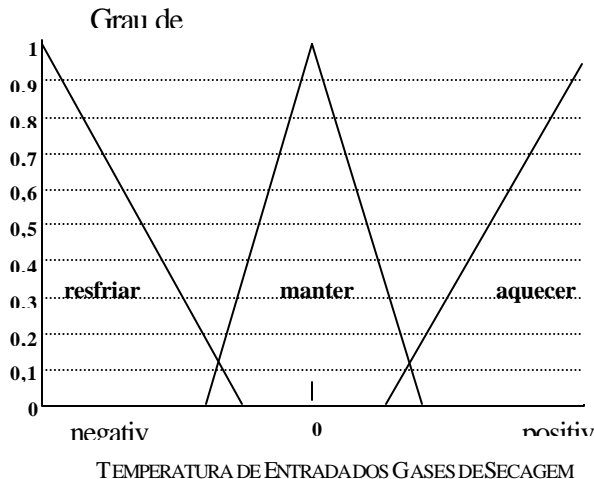
A ação a ser realizada em cada momento do funcionamento é o produto da contribuição ponderada de todas as regras, cada uma com seu peso (se é zero, não existe contribuição). Esta “medida ponderada” pode ser calculada de várias formas, e é o tema do

seguinte tópico.

4.2.4 ETAPA DE CONSEQUENTES

Os consequentes, similamente aos antecedentes, são formados por uma variável (de saída) com seu domínio correspondente. Por exemplo, a variável “temperatura de entrada dos gases de secagem” (aquecimento), citada no exemplo do controle da umidade de um pó atomizado em uma indústria cerâmica, teria como domínio um eixo contínuo com unidades positivas e negativas.

As ações são representadas como conjuntos difusos (ou etiquetas) neste domínio. Como foi indicado no tópico 4.2.2, o domínio (eixo X) da variável está intimamente relacionada com a escala de entrada do correspondente dispositivo físico de atuação sobre o sistema a controlar, de maneira que existam módulos intermediários que tem como função a transformação de magnitude e escala, garantindo a precisão necessária. Em cada aplicação concreta teremos restrições diferentes, das quais podemos destacar o tempo de resposta e a precisão necessária que nos levam à eleger o grau de realização do software empregado, se o



hardware deve ser específico ou não, etc. Retomando ao nosso exemplo, na figura 62 estão demonstradas três ações possíveis: “resfriar”, “manter” e “aquecer”.

Figura 62– Ações de um consequente

Seguindo as operações de cálculo de inferências difusas explicadas anteriormente, podemos realocar as mesmas na forma de um processo de controle. As operações de ponderação de consequentes e a união dos mesmos permitem o cálculo da ação de controle de saída. As duas primeiras resultam na ação que deve ser tomada, descrita por meio de conjuntos difusos, e que na terceira se transforma em uma ação “nítida” ou numérica, apta para

atuar com um sistema físico.

Supondo que existam as regras:

REGRA 1: SE antecedente1 ENTÃO aquecer

REGRA 2: SE antecedente2 ENTÃO manter

REGRA 3: SE antecedente3 ENTÃO resfriar

Ponderamos os consequentes aplicando a cada um deles o peso do cumprimento já calculado com o antecedente. O objetivo é obter um jogo de ações a serem realizadas, algumas mais importantes do que outras. Na figura 63 foi ponderado a ação “aquecer” por truncamento com o peso 0,6 da regra 1. O resultado é a zona sombreada, de altura e área inferiores. O truncamento (operação mínimo) oferece a vantagem da simplicidade de cálculo, ainda que também seja utilizado a operação de produto.

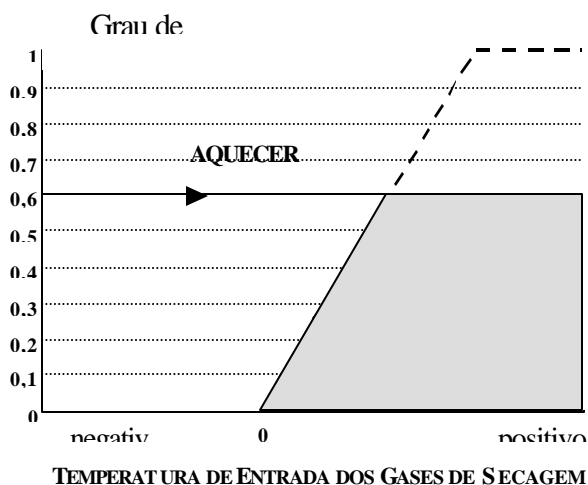


Figura 63 – Truncamento de uma consequente.

Supondo que a regra 2 (manter) tenha peso 0,3 e a regra 3 (resfriar) tenha peso 0. Procedemos a união das consequentes com a operação soma (Kosko, 1992), de maneira que resulte em uma única ação de aspecto acidentado, como na figura 64. A zona de maior área (aquecer) indica um maior peso da ação, ainda que existam outras ações (manter) de menor peso a ser considerado. Com isto, tem-se uma representação difusa da ação à tomar.

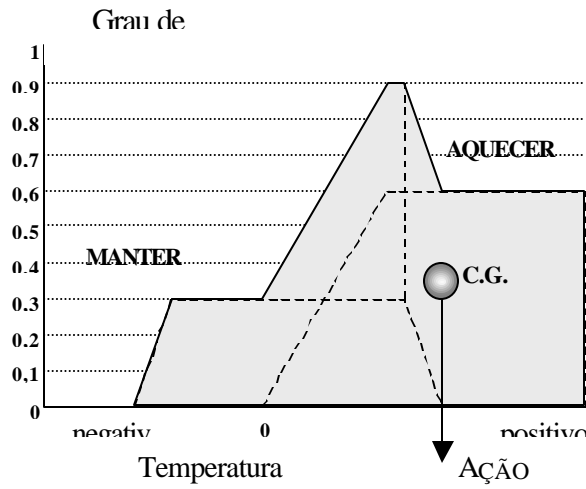


Figura 64 – União das conseqüentes.

Por último, nesta fase é necessário voltar ao mundo físico com valor concreto. É necessário eleger um ponto do domínio, que seja o mais representativo da ação à ser realizada. Ainda que possam ser aplicados vários métodos, o mais popular é a localização do centro de gravidade da ação difusa, ou mais exatamente sua coordenada “X”. Este ponto leva em conta toda a informação disponível, dando a ambos os lados igual peso e portanto equiparando igualmente as regras do jogo. Um outro método é a simples eleição do ponto mais alto da ação (operação máximo); ainda que ocorra perda de informação ganha-se em simplicidade de operação. Quando ocorrem diversos pontos de máximo, é realizada a média destes. Em geral, os métodos para calcular a ação resultante combinam a ponderação das regras e a união de conseqüentes utilizando os diversos operadores mencionados.

4.3 EXEMPLO DE UM PROJETO

No tópico 4.1 foi demonstrado o problema de projetar aplicando uma metodologia clássica. E com o objetivo de ilustrar a metodologia e a diferença de procedimentos em relação ao uso das tecnologias de lógica difusa, vamos realizar o mesmo exemplo, porém, empregando o procedimento utilizado em controladores difusos.

É evidente, a primeira vista, que ambos procedimentos são intrinsecamente diferentes. Mas é conveniente realçar algumas diferenças concretas, que muitas vezes não são comumente apreciadas; no exemplo citado no tópico 4.1, se tratava sempre de sistemas lineares, ou seja, sistemas nos quais os coeficientes de transferência não se alteram com o estado nem com o tempo, enquanto que os sistemas difusos se adaptam inclusive aos

sistemas não lineares. Por outro lado, não se pode esperar uma resposta linear de um controlador difuso, uma vez que no processo, a posição do centro de gravidade não varia linearmente com as variáveis dos antecedentes das regras, nem sequer nos casos em que as funções de pertinência são triangulares, simétricas e uniformemente distribuídas no universo em questão.

No que se refere ao modelo utilizado, os controladores difusos são melhores embasados em modelos de variáveis de estado no lugar de modelos de funções de transferência ou equações diferenciais (são denominadas variáveis de estado as que determinam sem ambigüidades o estado do sistema e se explicitam ainda sejam variáveis derivadas umas das outras, por exemplo: posição, velocidade, aceleração, ...). Finalmente, uma das diferenças essenciais é que os sistemas difusos são baseados em regras e não em equações. Sendo assim, o projeto é muitíssimo mais intuitivo. Voltando ao exemplo que nos ocupa, consideraremos diretamente um conjunto de regras que podem ser válidas para os objetivos almejados. E este conjunto pode ser o seguinte:

Nomenclatura:

ZR = Zero; PP, PM e PG = Positivo Pequeno, Médio e Grande respectivamente; NP, NM e NG = Negativo Pequeno, Médio e Grande respectivamente;; PN = Positivo Normal; NN = Negativo Normal; PA = Positivo Alto; NA = Negativo alto; Mq = Mais que; mq = menos que; $\theta = \theta_L - \theta_C$; $\omega = d\theta/dt$

Se θ é ZR e ω é ZR	então E = ZR
Se θ é PP e ω é ZR	então E = NP
Se θ é PM e ω é ZR	então E = NM
Se θ é PG e ω é ZR	então E = NG
Se θ é PP e ω é PN	então E = NM
Se θ é NP e ω é ZR	então E = PP
Se θ é NM e ω é ZR	então E = PM
Se θ é NG e ω é ZR	então E = PG
Se θ é NP e ω é NN	então E = PM
Se θ é ZR e ω é PN	então E = NP
Se θ é ZR e ω é PA	então E = PG
Se θ é ZR e ω é NN	então E = PP
Se θ é ZR e ω é NA	então E = PG
Se θ é Mq PP e ω é Mq ZR	então E = NG
Se θ é mq PP e ω é mq ZR	então E = PG
Se θ é PP e ω é NN	então E = PP
Se θ é NP e ω é PN	então E = NP

Através de uma simples verificação do conjunto de regras acima apresentadas, pode ser comprovado que todas elas levam o valor da posição angular θ_L ao valor da posição

desejada θ_c . Mesmo assim, não basta que isto seja assim. Para que o sistema de controle funcione corretamente, ao menos a resposta deve ser ágil e não devem ser produzidas oscilações apreciáveis. Foi com estes fins que foi introduzido um compensador no projeto do exemplo. Desta forma, devem ser avaliados quais os recursos que devem ser empregados na solução difusa para este problema.

Como existem diversas possibilidades de resolver tal problema, analisaremos algumas. Em primeiro lugar, o fato da excitação com maior ou menor intensidade segundo a posição e a velocidade ocorrer diretamente pelo estabelecido nas regras, uma vez que ambas as magnitudes são explícitas por estas regras como variáveis de estado que são. É possível observar estas circunstâncias no conjunto de regras estabelecido. Em segundo lugar, as funções de pertinência podem ser modificadas à vontade, tanto nos antecedentes como nos conseqüentes, de maneira que as distintas magnitudes poderão estar mais ou menos dentro dos conjuntos definidos segundo a necessidade. Tanto isto é verdade, que não existe ainda uma metodologia que permita encontrar as funções de pertinência ótimas para cada problema, mas também é certo que a idéia é tão intuitiva como a composição das regras e, além disto, a solução é sempre muito flexível. Ao mesmo tempo, este é um recurso muito pouco utilizado, as regras podem ser ponderadas de uma forma não uniforme, tal como foi descrito no tópico 4.2.3. Ainda, na solução foi considerado que todas as regras possuem o mesmo peso. Finalmente, deve ser destacado que a própria natureza da inferência difusa tem uma tendência a suavizar as respostas, de forma que as oscilações, que são produzidas basicamente por mudanças demasiadamente bruscas ou demasiadamente amplas, são amortizadas com maior facilidade nos controladores difusos. Em si, este último não é mais que uma conseqüência da natureza não linear dos sistemas.

Apoiados nestas considerações, é realizada uma abordagem para uma solução completa do problema, levando em consideração, que o conjunto dado de regras ou a composição dos conjuntos difusos que são apresentados a seguir não são soluções únicas nem ótimas. A otimização só é alcançada após a experimentação direta ou por simulação, padrão em qualquer método, seja convencional ou não. Todavia, deve ser frisado que este processo de depuração será realizado com maior facilidade no caso difuso, já que este problema consiste na modificação do conjunto de regras, ou da definição do conjunto (parâmetros lógicos), diferentemente do que ocorre no projeto convencional no qual as modificações são estruturais ou de parâmetros físicos.

Na figura 65 pode ser visualizada uma definição das funções de pertinência adequadas ao problema.

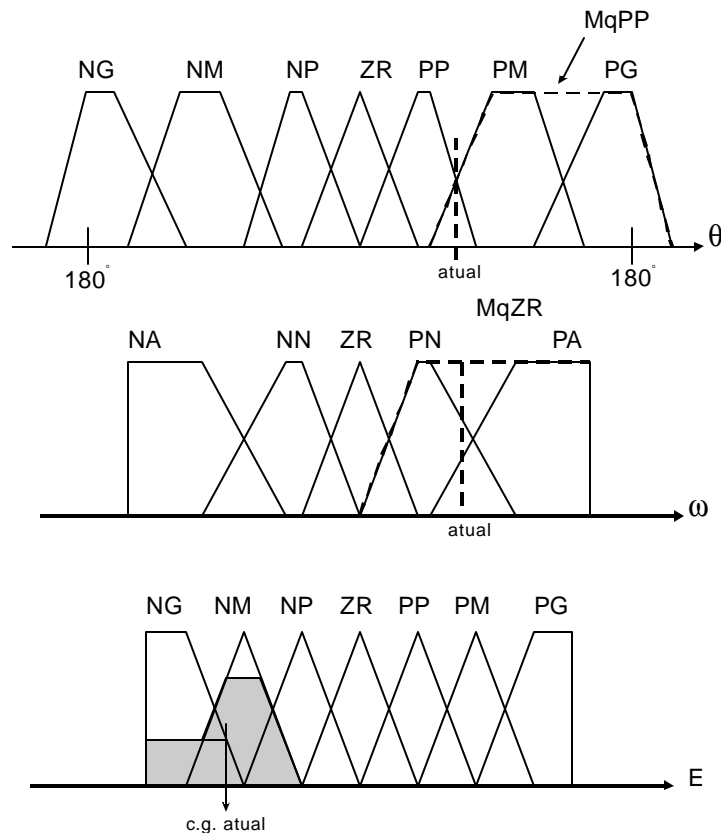


Figura 65 - Conjunto de funções de pertinência para controle.

Pode ser observado que quando a variável θ ou sua derivada ω se aproximam de zero existe uma discriminação mais forte entre os conjuntos (abrangem uma região menor do universo, com o que denotam menor incerteza) do que para valores mais altos, nos quais, por estarem mais afastados da situação de equilíbrio não necessitam de um ajuste maior. Por outro lado, é igualmente importante notar que foram tomados cuidados especiais para que a situação de equilíbrio seja exata e nunca ambígua. Com efeito, somente no zero é aonde se encontra o máximo desta função de pertinência (é de forma triangular). Além disto, este é o único ponto que possui pertinência zero para as funções adjacentes ao zero, ou seja, "positivo pequeno" e "negativo pequeno", de forma que, de acordo com as regras, esta é a única posição na qual o sistema estará em repouso.

Quem sabe, o êxito do controle difuso se deva ao modo de definir o controlador como um conjunto de regras lingüísticas, em relação à teoria clássica. Porém, uma forma mais conveniente de caracterizá-lo possa ser enumerado nos casos em que é apropriado aplicá-lo:

- Não se conhece um modelo matemático ou este é complexo (não linear, ordem elevada, etc.);
- Certas partes do sistema a ser controlado são desconhecidas, não mensuráveis (processos químicos ou biológicos), com medidas não confiáveis (erros e tolerâncias);

- Quando é detectada a presença de indeterminação ou incerteza;
- Mesmo com a complexidade ou a ausência de modelo do sistema, o comportamento do operador é expressado linguisticamente, na forma de condições e ações;
- Existem processos de ajuste/desajuste: quando uma ação de controle pode indiretamente desajustar um parâmetro estável anteriormente.

Também é interessante conhecer algumas das vantagens que podem ser obtidas com este tipo de controle:

- Tempo de formação de pessoal especializado em projetos de controladores é muito curto. Além de não existir a necessidade de dominar com profundidade os fundamentos teóricos;
- Não é necessário um modelo matemático do ente a controlar;
- A expressão em regras lingüísticas é muito próxima de como o operador entende o problema. Por um lado as regras representam a estrutura lógica, e por outro as etiquetas difusas se identificam com a linguagem cotidiana. Isto compõe uma ferramenta simples e fácil de usar;
- Os controladores difusos permitem tanta ou mais precisão que os não difusos. Muitas aplicações alcançam mais rapidamente a estabilidade, inclusive em etapas antes consideradas transitórias. Tudo isto indica, em geral, iguais ou melhores prestações para um custo e complexidade menores;
- Alta tolerância ao ruído e a variações no sistema controlado;
- Facilmente configuráveis, agregando ou retirando regras;
- Alto grau de paralelismo.

Apesar de tudo que já foi citado, o campo de aplicação do controle difuso continua sendo tema de pesquisa, do qual podemos destacar as seguintes áreas:

- Criação de métodos de geração de regras;
- Criação de métodos de ajuste das formas da função de pertinência;
- Avaliação do rendimento, à princípio de um hipotético controlador difuso;
- Metodologias de projeto de sistemas de controle.

Estes últimos pontos levam a considerar que não é possível aplicar o controle difuso a qualquer problema que se apresente. A opinião geral de pesquisadores (Phillips, 1991) que empregaram este tipo de solução com êxito é de que é melhor não dispor a priori de uma solução difusa, mas sim estudar o problema e se este apresentar características que aconselhem a lógica difusa (como por exemplo a presença de incerteza), aí sim recorrer a esta

solução. Foram combinados, com êxito, controladores clássicos com difusos, obtendo uma solução grosseira com o primeiro e afinando com o segundo. (Trillas et al, 1994)

4.4 COMO CAMINHA A LÓGICA DIFUSA NOS DIVERSOS CAMPOS DE APLICAÇÃO

4.4.1 APLICAÇÕES CLÁSSICAS

As aplicações da Lógica Difusa na última década estão agrupadas em três campos prioritários:

- Sistemas Inteligentes;
- Controles Automáticos;
- Reconhecimentos de Formas.

Sistemas Inteligentes são programas projetados para suportar a tomada de decisão em campos específicos e são formados fundamentalmente por três módulos fundamentais: um banco de conhecimento, um motor de inferência e uma interface com o usuário que inclui uma componente explicativa com relação ao processo dedutivo que ocasionou uma determinada proposição de ação. A Lógica Difusa têm um papel de fundamental importância tanto, na representação formal do conhecimento mediante regras condicionais difusas, como no processamento destas regras no chamado Motor de Inferência.

A área do Controle Automático (difuso) é uma aplicação especializada dos Sistemas Inteligentes Difusos. É o "saber como se faz" de um operador experiente, que recolhido no Sistema Inteligente Difuso. Sensores provêm a informação de entrada necessária e o Sistema Inteligente determina o tipo de excitação necessária de, por exemplo, os motores e outros agentes atores do sistema controlado, para que este se mantenha em regime ótimo de trabalho.

O problema do Reconhecimento de formas é um dos problemas clássicos da Inteligência Artificial e tem sido abordado por duas correntes principais. Uma de caráter matemático/estatístico e outra de caráter formal/sintático, à estas veio a se somar o Reconhecimento de Formas baseado em Lógica Difusa, na qual se aproveita vantajosamente a propriedade de poder processar formalmente informações incompletas ou "difusas". A utilização da Lógica Difusa no Reconhecimento de Formas pode ser considerado como uma das primeiras aplicações conhecidas, já que apenas um ano depois da publicação do trabalho de Lotfi Zadeh, Bellman, Kalaba e o mesmo Zadeh (1966) publicaram um trabalho sobre este tema. Mais tarde, Tamura, Higuchi e Tanaba (1971) continuaram com a idéia de utilizar relações difusas no problema de classificação de formas, enquanto que Thomasson (1973)

estudou a aplicação de linguagens formais Difusas na linha do reconhecimento sintático de formas.

4.4.2 APLICAÇÕES DIVERSAS

Uma área de aplicação da Lógica Difusa, que sem ser menos importante, recebeu uma aparente divulgação menos generalizada foi a pesquisa de Operações e Otimizações (Prade, 1960 e Campos, 1989).

A área de Tomada de Decisões é uma área na qual as propriedades da lógica difusa relativas ao processamento da informação incompleta podem ser aproveitadas de uma forma vantajosa. Bellman e Zadeh (1970) foram um dos primeiros em ressaltar esta propriedade, mas o interesse na pesquisa tem-se mantido através dos anos (Okuda et al, 1978; Gupta et al, 1977 e Felix, 1991).

As ciências econômicas médicas e sociais, em sua concepção mais ampla, apresentam uma série de temas de pesquisa onde a Modelação mediante Lógica Difusa pode exercer um papel preponderante (Felix, 1991). Neste ponto é importante mencionar a possibilidade de modelar os movimentos de pessoas invalidas como um suporte ao processo de projeto de produtos destinados à compensar as suas dificuldade em função do grau de invalidez.

Linguagens de programação (Felix et al, 1992) e bases de dados (Chang, 1978; Buckles, 1982 e Zemankova-Leech, 1984), representam uma área onde também é possível encontrar aplicações repletas de êxitos da Lógica Difusa.

Nos últimos anos acentuaram-se os trabalhos que tentam encontrar uma relação de sinergia entre a Lógica Difusa e as Redes Neurais. Estas iniciativas têm sido respaldadas pela Organização de Conferências Internacionais dedicadas exclusivamente a este tema, tanto no Japão (Série Lizuka) como nos E.U.A., com o auspício da NASA. Nesta área de pesquisa, se trata de levantar os aspectos vantajosos de cada tema, utilizando ambos mecanismos em um mesmo projeto ou desenvolvendo redes do tipo neuronal, mas com capacidade de aprendizagem dos modelos difusos.

4.4.3 BASES DE DADOS RELACIONAIS DIFUSAS

Neste ponto são analisados alguns estudos realizados até o momento no campo das Bases de Dados com Informação Imprecisa. O problema fundamental estabelecido nestes trabalhos é o seguinte:

O que fazer com a informação imprecisa?

Formular esta questão no sentido mais amplo possível, seria dizer que se pode trabalhar com:

A) Perguntas cujas constantes associadas não estão bem definidas, como por exemplo:

"Encontrar todos os indivíduos jovens com salário não muito alto" se na Base de Dados Relacional (BDR) o campos relativos à idade e ao salário são numéricos.

B) Valores de atributos mal conhecidos como:

"A idade de João está entre 30 e 35 anos".

C) Associações entre itens pouco conhecidos ou incertos, como por exemplo:

"O certificado de Qualidade foi fornecido quase que seguramente pelo Laboratório 'A', mais existe uma pequena possibilidade de que este tenha sido fornecido pelo Laboratório 'B'.

É possível abordar o problema de flexibilizar o modelo relacional com o objetivo de admitir a imprecisão dentro do mesmo. Os trabalhos mais relevantes sobre este tema podem ser agrupados em duas classes:

I) Aqueles estudos que tentam contestar as perguntas imprecisas para uma Base de Dados Relacional Clássica, o que implica em somente conter trechos precisos. Estas se ocupam de resolver situações do tipo 'A'.

A maioria dos trabalhos existentes neste sentido procuram realizar uma modificação na Álgebra Relacional, mais concretamente nas operações de seleção e reunião para que admitam condições formuladas de um modo vago. Existem duas formas de fazer isto, em primeiro lugar se pode tentar transformar de alguma maneira estas questões em condições booleanas. Este é o enfoque de autores tais como Chang (1982) e Ichikawa & Hirakawa (1986). Neste caso a relação resultante como resposta a pergunta é clássica no sentido de ser um conjunto de duplas bem definido.

Outra forma de abordar o problema é baseado na teoria de subconjuntos difusos (Zadeh, 1977), que considera toda questão do tipo impreciso pode ser formulada como combinações de proposições lingüísticas. Este é o enfoque adotado nos trabalhos de Bosc (1988) e de Kacprzyk & Ziolkowski (1986). Tais trabalhos utilizam o fato de que toda a propriedade imprecisa pode ser modelada como um subconjunto difuso de domínio onde se emprega, por tanto sempre existe um grau de cumprimento da mesma para valores exatos no dito domínio. A combinação destes graus de cumprimentos para proposições compostas por meio da Lógica Difusa permite definitivamente consignar um grau de cumprimento para cada dupla de relação onde se impõe a propriedade. Desta forma, o resultado de uma pergunta imprecisa é uma relação difusa.

II) A segunda classe de trabalhos possui uma meta muito mais ambiciosa, uma vez que não trata de responder perguntas imprecisas que partem de uma Base de Dados Relacional Clássica. O problema consiste em introduzir informações imprecisas dentro de uma base de dados e responder a perguntas imprecisas ou não, a partir desta. Os modelos mais elaborados de Bases de Dados Relacionais imprecisas estão baseados na teoria de subconjuntos difusos. Na literatura existem duas abordagens para definir bases de dados:

De um lado está o modelo de Buckles e Petry (1982, 1984, 1987 e 1989) e o de Anvari e Rose (1987), onde se considera que as duplas estão imprecisamente definidas, por que cada uma pode tomar para um atributo dado um conjunto de valores do domínio correspondente no lugar de um valor simples. Assim mesmo se supõe que exista uma relação de semelhança no domínio de cada atributo, permitindo que sejam fixados o início e os níveis de agregação para cada dupla ou relação. Estes autores desenvolveram também uma generalização da Álgebra e do Cálculo Relacional.

O segundo modelo é o seguido pela maioria dos pesquisadores, como por exemplo podem ser citados, Umano (1982 e 1983), Prade & Testemale (1984 e 1987), Zemankovaleech & Kandel (1984) e Baldwin (1979 e 1983). Tal modelo, definido como modelo possibilístico, consiste em estabelecer que uma base de dados relacional difusa é aquela no qual o valor de um dado atributo pode ser um subconjunto difuso de seu domínio. Significando dizer que, todo compartimento de uma relação pertencente a uma base de dados relacional difusa pode incluir uma distribuição de possibilidades sobre o domínio do atributo correspondente, e ainda, em certos modelos (Umano & Baldwin) admite-se que exista associado a cada dupla um grau de comprometimento. Foram desenvolvidos mecanismos de questionamento a uma base de dados deste tipo, baseando-se em Álgebra Relacional e na Teoria das Possibilidades.

4.4.4 APLICAÇÕES AO PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

As aplicações de controle e de realização de sistemas inteligentes são extraordinariamente amplas que dificultam a localização de outras aplicações que não compartilhem destas mesmas técnicas. Concentrando no assunto "projeto assistido por computador", parece lógico pensar que uma aplicação desta natureza não é mais do que um sistema inteligente especializado em relação a algum tipo de projeto para a engenharia (Felix, 1992). Contudo, este tipo de aplicação possui suficiente identidade própria para serem consideradas a margem das anteriores, já que envolvem conceitos onde a lógica difusa é de grande utilidade em aspectos diferentes do que são as bases de conhecimento ou seu processamento.

Tudo isto deriva das soluções de projeto que são normalmente muito numerosas, Por outro lado, a seleção dos tipos de solução depende de muitos fatores, mas somente depois de conhecidas todas as distintas soluções é que se pode selecionar qual delas pode ser a ótima, de acordo com os critérios e objetivos estabelecidos. Como conseqüência, é necessário estabelecer quais são os objetivos prioritários que devem estar presentes na solução final, para então deduzir os critérios de seleção das soluções. Ou seja, seria muito diferente estabelecer que a solução deva ser o mais barato possível, ou estabelecer que sistema final deva ocupar o mínimo espaço possível, ou que seu peso não deva ultrapassar um certo limite, etc. Neste ponto, já existe a necessidade de empregar múltiplos conceitos difusos que, por sua vez, estarão normalmente interrelacionados entre si. Por exemplo, poderíamos encontrar descrições do tipo:

"O sistema final deve ser econômico, mas conservando níveis *standart* de qualidade. Deve ser compatível a um tamanho não superior ao de um livro. Seu peso deve ser razoável para que possa ser transportado por uma pessoa em uma bolsa, ..."

Desta forma, os conceitos de "econômico", "qualidade *standart*", ect... devem estar definidos previamente.

O exemplo citado anteriormente demonstrou nada mais do que um primeiro passo dentro da problemática do projeto. É neste ponto que quando, estabelecidos os objetivos, se deve ir para a solução, processo na qual deverão ser empregados heurísticos com muita freqüência.

O primeiro problema é estrutural, pergunta-se qual o tipo de estrutura que será empregado para solucionar os critérios estabelecidos. Para responder a esta pergunta é necessário possuir muito bem especificadas todas as estruturas possíveis ou, ao menos, aquelas que são de uso mais habitual e cobrem o espectro suficiente para não correr um risco apreciável de ignorar soluções sensivelmente mais vantajosas (Campos, 1989 & Felix, 1992). Uma vez especificadas estas estruturas, é necessário ter igualmente definida suas características mais relevantes com a finalidade de obter a mais adequada em função dos objetivos especificados.

O segundo problema é tecnológico, pergunta-se qual é a tecnologia mais adequada à ser empregada para o caso. Igualmente, para responder a esta pergunta devem ser especificadas as tecnologias existentes e definir as características mais destacadas com relação as demais.

A partir deste ponto, o mesmo problema que foi exposto para o sistema completo se repetem para todos os subsistemas que compõem a estrutura e irá reduzindo pouco a pouco aos níveis de abstração inferiores, até chegar a níveis abaixo dos quais é inútil baixar,

pois existem componentes primários ou conceitos indivisíveis em subconceitos ou em subsistemas.

O esquema do procedimento, por outro lado, pode ser muito diferente de um caso para outro, uma vez que os controles intermediários devem existir para que não se obtenha uma solução irreal. Por exemplo, uma vez determinadas a estrutura e a tecnologia iniciais, o mais normal é que este passe por uma etapa de simulação e de comprovação de que o funcionamento a este nível cumpre as especificações. O que deve se repetir nas sucessivas ocasiões em que a complexidade do realizado seja maior do que permite pressupor cautelosamente que o funcionamento deva ser correto e segundo o previsto.

Ao longo da descrição anterior foi possível observar que nas aplicações de projeto assistido por computador se pode estabelecer que quanto menos uma estrutura de procedimentos adaptáveis a projetos de qualquer natureza, sejam arquitetônicos, mecânicos, eletrônicos, ópticos, etc. Mas ao mesmo tempo, é importante notar que, ainda que os projetos requeiram muitas vezes cálculos precisos, por exemplo a curvatura de uma lente em um sistema óptico, em uma grande quantidade de aspectos estes projetos estão sujeitos a incerteza e regulados por regras empíricas imprecisas, por exemplo, "se o módulo digital possui muitas variáveis, é conveniente realizá-lo mediante matrizes lógicas programáveis".

A generalização do procedimento, apesar da enorme diversidade temática é o que fornece ao projeto assistido por computador uma dimensão específica dentro das aplicações da lógica difusa.

CAPÍTULO 5 – A MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE DO ATOMIZADOR

O trabalho até este ponto vem descrevendo o processo de atomização, as formulas que regem este processo, o que é a lógica difusa e como esta atua em um controle de processos, como um ensaio em laboratório não pode ser comparado com os resultados de um processo produtivo industrial. O objetivo deste capítulo será demonstrar claramente o procedimento para solucionar o problema de modelar de um sistema de controle por lógica difusa empregado na secagem por atomização de produtos cerâmicos.

5.1 PROCEDIMENTO DE FABRICAÇÃO PROPOSTO

O processo de fabricação, na atualidade, está baseado em quatro pontos principais que são: controle da temperatura de entrada do gás de secagem; controle da vazão do fluido a

ser secado; controle de umidade do produto secado; e controle da granulometria do produto secado. O procedimento com uma abordagem empregando a lógica difusa, propõem um controle que atuará de forma direta sobre os controles de temperatura e vazão de entrada do gás de secagem, da vazão do fluido a ser secado e da umidade deste produto. E de forma indireta na granulometria deste produto, uma vez que esta característica é fortemente influenciada pelas variações que ocorrem no processo produtivo de secagem por atomização.

Para uma facilitar a aplicabilidade destes controles, será necessário que sejam automatizados alguns procedimentos corriqueiros deste processo. Este trabalho deverá propiciar um controle efetivo do processo que emprega a lógica difusa como interface na tomada de decisões. E com isto, obtendo a minimização dos defeitos originados nesta etapa.

Os componentes necessários para a operação assistida pelo novo controle do secador por atomização são: termopares colocados em pontos estratégicos ao longo do percurso, com os quais poder-se-á verificar as perdas e oscilações de temperaturas ao longo do equipamento; equipamento para medir a vazão dos gases aquecidos, colocado o mais próximo possível (em função do desenho do equipamento) da entrada destes gases no atomizador; equipamento para controlar a vazão/emissão do gás de aquecimento; equipamento para medir a vazão do fluido a ser atomizado colocado o mais próximo possível do bico de atomização; equipamento para controlar a vazão do fluido colocado após a bomba de recalque (ou após os filtros, caso existirem); equipamento para análise “on-line” da umidade do produto secado na unidade de atomização; microprocessador com condições de analisar os dados emitidos pelos equipamentos, e ao mesmo tempo poder exercer um controle efetivo sobre o processo, em função de padrões previamente definidos pela lógica difusa.

5.1.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MODELAGEM

Os controles que passam a ser exercidos pelo processo estão descritos no item 1.2 deste trabalho, porém devem ser ressaltados alguns pontos com o objetivo principal de facilitar a sua compreensão, assim:

- ➔ O gás que é aquecido em uma unidade específica para este fim, locomove-se em direção ao atomizador e próximo de sua liberação, ou seja, momentos antes dele entrar na câmara de secagem é realizada uma verificação da sua vazão. O seu valor é comparado com parâmetros previamente definidos pelo sistema de controle, e em função dos padrões necessários ao processo este poderá ativar uma ação de correção.

- O fluido (denominado barbotina) que está armazenado nas “vascas” também é conduzido para o interior do atomizador, a sua vazão pode ser controlada e o seu valor é monitorado constantemente. E da mesma forma que o gás de secagem, o seu valor também é comparado com parâmetros previamente definidos pelo sistema de controle, e em função dos padrões necessários ao processo este poderá ativar uma ação de correção.
- Quando a operação de atomização estiver concluída, o produto gerado por este processo passará por um analisador de umidade, que envia seus valores para o sistema de controle de forma que este possa avaliar a sua coerência com os valores de controle. Quando tais valores oscilarem, o sistema de controle irá restaurar os valores ótimos da forma mais conveniente para o processo. O sistema atuará de forma que se restaurem tais valores previamente estabelecidos, influenciando na vazão dos equipamentos. Este também atuará de forma que o perfil de temperaturas dentro do atomizador esteja dentro dos padrões necessários.

E como estes procedimentos citados acima são controlados por padrões presentes no modelo baseado em regras do controle do secador, é necessário definir estas regras.

5.1.2 REGRAS DIFUSAS A SEREM EMPREGADAS NA MODELAGEM DA SOLUÇÃO

A formulação de modelos de raciocínio difuso está alicerçado, até o momento, na representação baseada em regras. Ou seja, um sistema pode agrupar um conjunto de respostas possíveis e a forma de raciocínio consiste em propagar graus de certeza (Certainty Factors: CFs) desde as premissas até as respostas possíveis, através de uma árvore de encadeamento de regras (figura 66).

Na figura 66 o tópico "A" é o Objetivo Resposta, o "B" são as regras de nível (n), o "C" são as regras de nível (n-1) e o "D" são as premissas das regras de nível 1. E a forma de montagem é, em primeiro lugar, organizar a árvore de encadeamento correspondente a cada objetivo resposta possível, e na continuação, propagar os fatores de certeza sobre a estrutura da árvore.

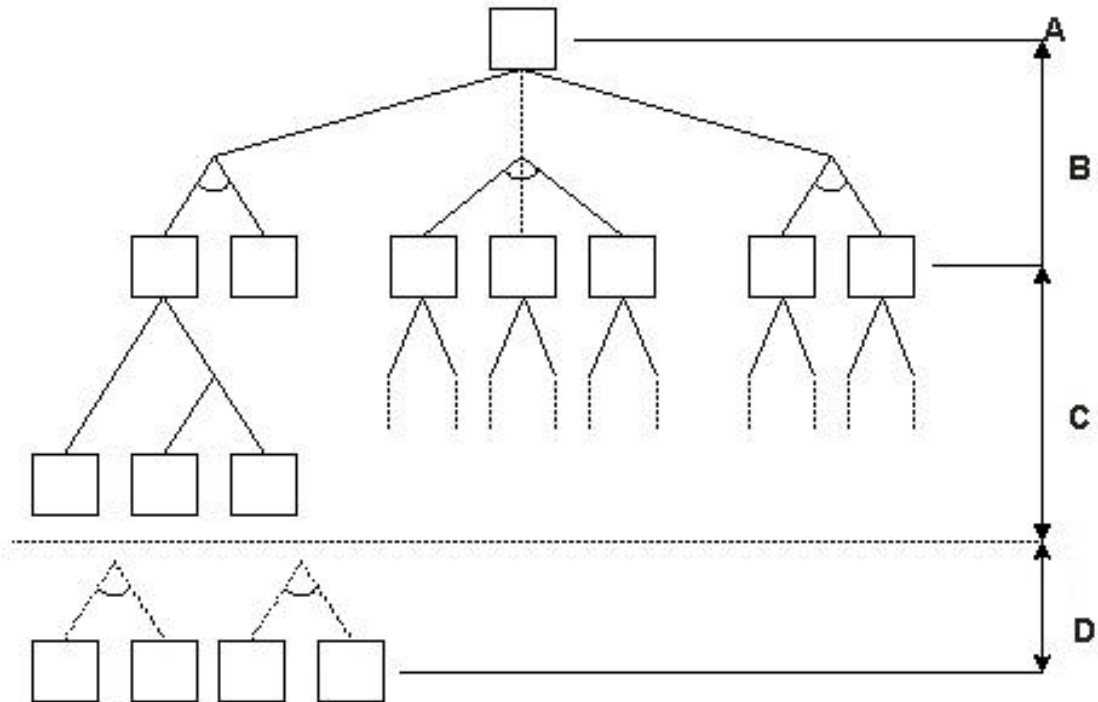


Figura 66 - Exemplo de uma árvore de inferência para um tipo de resposta.

As operações de propagação dos fatores de certeza entre cada nível de inferência são:

- A. Avaliação do fator de certeza das premissas de cada regra.
- B. Conhecido o fator de certeza da relação de consequência representada pela regra, obter o fator de certeza da conclusão.
- C. Conhecidos os fatores de certeza procedentes de várias regras sobre a mesma conclusão, obter o fator resultante do balanço dos mesmos.

O cálculo dos fatores de certeza é empírico já que, ainda que formulada inicialmente partindo das probabilidades, algumas regras de composição (tipo A) são obtidas da lógica difusa e outras são baseadas em formulações "*ad hoc*" que a experiência mostrava serem razoáveis (tipos B e C).

Bonnisson e Decker (1986) propuseram um delineamento mais rigoroso deste conceito de propagação de evidência utilizando conceitos *Fuzzy* baseados nos seguintes critérios:

- A) É definida uma escala de termos lingüísticos para avaliar a veracidade de qualquer afirmação.
- B) O significado de cada termo lingüístico é definido por números *Fuzzy* em um intervalo real $[0, 1]$. Um número *Fuzzy* em um conjunto *Fuzzy* é caracterizado por uma função de

pertinência com distribuição de possibilidade trapezoidal formulada por quatro valores. Assim são formuladas tabelas com 5, 9 e 13 termos do tipo exemplificado na tabela 17:

<u>Termo Lingüístico</u>	<u>Significado <i>Fuzzy</i></u>
Impossível	<0.00, 0.00, 0.00, 0.00>
Muito Improvável	<0.10, 0.20, 0.01, 0.05>
Muito Pouco Provável	<0.10, 0.18, 0.06, 0.05>
Pouco Provável	<0.22, 0.36, 0.05, 0.06>
Possível	<0.41, 0.58, 0.09, 0.07>
Significativo	<0.63, 0.80, 0.05, 0.06>
Bastante Provável	<0.78, 0.92, 0.05, 0.06>
Muito Provável	<0.98, 0.99, 0.05, 0.01>
Certo	<1.00, 1.00, 0.00, 0.00>

Tabela 17 – Equivalência entre os termos Lingüístico e *Fuzzy*

Os dois primeiros valores são os limites do intervalo e os dois seguintes são as oscilações (tolerância) a direita e a esquerda. E este exemplo é um resumo que foi obtido do trabalho de Beyth-Marom (1995).

- C) O cálculo da incerteza é definido com base em funções binárias do tipo T-normais e S-conormais, $T(a,b)$ e $S(a,b)$ que são funções monótonas comutativas e associativas, tais que quando aplicadas aos extremos do intervalo $[0,1]$ satisfazem as tabelas de verdade da conjunção e disjunção. Alguns exemplos destas estão expostos a seguir.

<u>T-normais</u>	<u>S-conormais</u>
$T_0(a,b) = \min(a,b)$ se $\max(a,b) = 1$ 0 em outro caso, 1 em outro caso	$S_0(a,b) = \max(a,b)$ se $\min(a,b) = 0$
$T_1(a,b) = \max(0, a+b-1)$	$S_1(a,b) = \min(1, a+b)$
$T_2(a,b) = a \cdot b$	$S_2(a,b) = a+b-ab$
$T_3(a,b) = \min(a,b)$	$S_3(a,b) = \max(a,b)$

- D) É aplicado para a obtenção do grau de certeza das premissas T-normais, assim como para a propagação da certeza verticalmente ao longo da regra. Para a acumulação horizontal de certezas sobre uma mesma conclusão provenientes de distintas regras se aplica uma S-conormal.
- E) Estas formas de combinar são expressadas superficialmente na forma agregada, mediante tabelas de combinação das etiquetas lingüísticas combinadas, ou seja, se expressava qual era a etiqueta resultante da combinação 'significativo' com 'bastante provável'.

Bonissone propôs posteriormente um nível de controle superior, um sistema de raciocínio do tipo que elege uma ou outras normais ou conormais dependendo da classe de evidência que se combina, o que implica no uso de uma espécie de conhecimento com inteligência em qualidade e adequação de normais e conormais.

E este trabalho propõe tratar a representação do conhecimento baseado em conceitos deste tipo, porém com algumas variações, entre elas se encontra a utilização de um nível superior de raciocínio, que permite encontrar um subconjunto de possíveis respostas para a análise detalhada anteriormente. Com o tempo, o processo caminhará para modelar a propagação vertical de certezas via funções geradoras de *modus ponens* (Valverde, 1985) associadas a modelação da implicação, bem via uma T-normal como a comentada anteriormente, ou via uma S-conormal aplicada a negociação do antecedente e a conclusão.

5.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

Resumindo o que foi exposto até este ponto do trabalho, conclui-se que devem existir variáveis de estado que representam os fatores que estão presentes no processo de secagem por atomização, associadas a variáveis lingüísticas que representam as ações executadas pelos operadores do equipamento de secagem por atomização. Assim, as variáveis de estado são a umidade, as vazões de barbotina e do ar, e a temperatura do ar. As variáveis lingüísticas associadas a umidade são: perigosamente seco, muito seco, seco, normal, úmido, muito úmido e perigosamente úmido. As variáveis lingüísticas associadas a vazão da barbotina e do ar são: muito baixo, baixo, ideal, alto e muito alto. E, as variáveis lingüísticas associadas a temperatura do ar são: muito baixo, baixo, ideal, alto e muito alto. E de uma forma mais ampla para ser observado, foi criada a tabela 18.

As variáveis de controle representam os fatores que podem ser alterados, influenciando de uma forma bastante marcante no processo de secagem. Da mesma forma, estão associadas à estas variáveis alguns valores lingüísticos que representam o quanto estes variam. E na tabela 19 estão demonstradas as associações entre as variáveis de controle e os valores lingüísticos.

VARIÁVEIS DE ESTADO		VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS ASSOCIADAS
Umidade	⇒	Perigosamente seco
		Muito seco
		Seco
		Normal
		Úmido
		Muito úmido
		Perigosamente úmido
Vazão da barbotina e do ar	⇒	Baixo
		Ideal
		Alto
Temperatura do ar	⇒	Baixo

Ideal
Alto

Tabela 18 – Associação entre as variáveis de estado e as lingüísticas.

Variáveis de Controle		Valores Lingüísticos
Vazão de barbotina e de ar	⇒	Muito baixo
		Normal
		Muito alto
Temperatura do ar	⇒	Muito baixo
		Normal
		Muito alto

Tabela 19: Associação entre as variáveis de controle e os valores lingüísticos.

A idéia de definir valores de certeza a declarações e operar com eles, é uma tentativa de generalizar uma linguagem de regras do tipo predicativo. Nesta linguagem devem ser aceitas cláusulas que tenham associados a elas, um grau de suporte definido por um par de medidas que são as de necessidade e as de possibilidade. Assim, o processo dedutivo pode propagar estas medidas de suporte paralelamente ao processo de inferência lógica.

A base da representação está apoiada em um conjunto de atributos X_1, X_2, \dots, X_n que caracterizam o universo sobre o qual se está argumentando, tomando valores nos domínios D_1, D_2, \dots, D_n . Os valores que se tomam sobre estes domínios são caracterizados por uma escala de categorizações qualitativas, AQ_i , aceitas na linguagem usual, tal que:

$$DQ_i \text{ é } \langle AQ_1, AQ_2, \dots, AQ_n \rangle$$

Assim, por exemplo, X_i pode ser a Temperatura do ar que entra no atomizador, avaliada no domínio dos números naturais D_i : $\langle 90, 130 \rangle$ e caracterizada por uma escala qualitativa de valores $DQ_i = \langle \text{muito baixa, baixa, normal, alta, muito alta} \rangle$. A consignação de qualitativos DQ_i que procedem do universo da informação subjetiva, fonte de conhecimento de senti do comum, são representadas por distribuições de possibilidade em D_i .

Sobre esta base de representação podem ser modelados fatos básicos do tipo X_i é AQ_{ij} .

Desta forma é possível formular regras do tipo:

$$X_i \text{ é } AQ_{1k}, \dots, X_n \text{ é } AQ_{nr} \rightarrow Y \text{ é } B_{nl}$$

A forma de inferência é o *modus ponens* generalizado:

$$\frac{\begin{array}{l} X_i \text{ é } AQ_{1r}, \dots, X_n \text{ é } AQ_{nk} \\ X_i \text{ é } AQ_{1k}, \dots, X_n \text{ é } AQ_{nr} \end{array}}{Y \text{ é } B_{nl}}$$

REGRAS:

	R1	Perigosamente Seco	a vazão de ar é alta e a vazão da barbotina é baixa
	R2	Muito Seco	vazão da barbotina é baixa

se o valor da de quantidade Umidade está	R3	Seco	ENTÃO	a vazão de ar é alta
	R4	Normal		a vazão de ar e barbotina, ideal
	R5	Úmido		a vazão de ar é baixa
	R6	Muito Úmido		vazão da barbotina é alta
	R7	Perigosamente Úmido		a vazão de ar é baixa e a vazão de barbotina é alta

Tabela 20: Regras definidas para atuar sobre a umidade

se o valor da Temperatura do ar	R8	Muito baixo	ENTÃO	Rendimento do Aquecedor muito baixo
	R9	Baixo		Rendimento do Aquecedor baixo
	R10	Normal		Rendimento do Aquecedor ideal
	R11	Alto		Rendimento do Aquecedor alto
	R12	Muito alto		Rendimento do Aquecedor muito alto

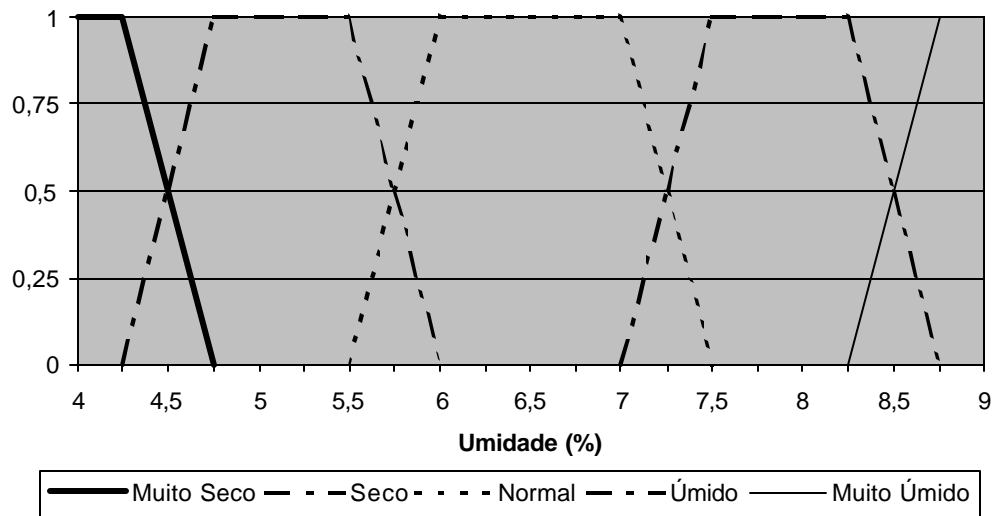
Tabela 21: Regras definidas para atuar sobre a temperatura

UMIDADE	TEMPERATURA DO AR				
	muito baixo	Baixo	Normal	Alto	muito alto
Perigosamente Seco	R1/R8	R1/R9	R1/R10	R1/R11	R1/R12
Muito Seco	R2/R8	R2/R9	R2/R10	R2/R11	R2/R12
Seco	R3/R8	R3/R9	R3/R10	R3/R11	R3/R12
Normal (ideal)	R4/R8	R4/R9	R4/R10	R4/R11	R5/R12
Úmido	R5/R8	R5/R9	R5/R10	R5/R11	R5/R12
Muito Úmido	R6/R8	R6/R9	R6/R10	R6/R11	R6/R12
Perigosamente Úmido	R7/R8	R7/R9	R7/R10	R7/R11	R7/R12

Tabela 22: Associação das regras da tabela 20 e 21

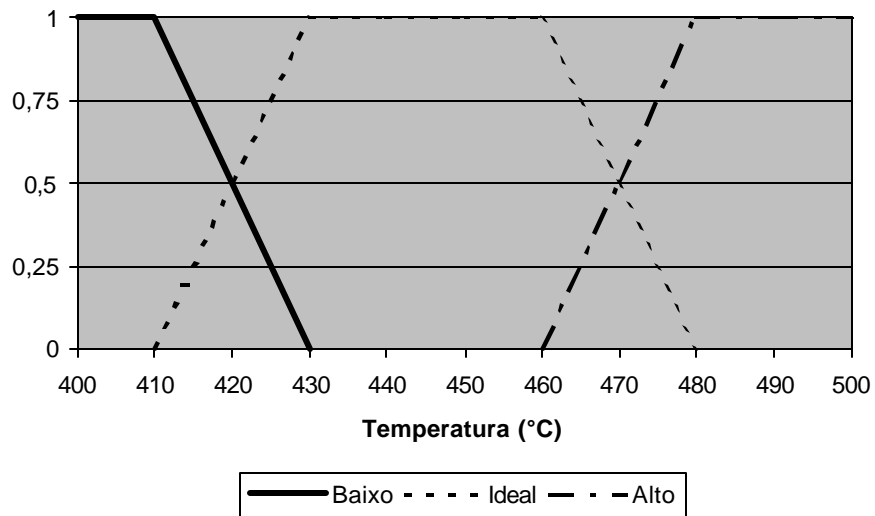
UMIDADE	TEMPERATURA DO AR				
	muito baixo	Baixo	Normal	Alto	muito alto
Perigosamente Seco	$-V_a - V_b ++T$	$-V_a - V_b +T$	$-V_a - V_b T$	$-V_a - V_b -T$	$-V_a - V_b --T$
Muito Seco	$V_a - V_b ++T$	$V_a - V_b +T$	$V_a - V_b T$	$V_a - V_b -T$	$V_a - V_b --T$
Seco	$-V_a V_b ++T$	$-V_a V_b +T$	$-V_a V_b T$	$-V_a V_b -T$	$-V_a V_b --T$
Normal (ideal)	$V_a V_b ++T$	$V_a V_b +T$	$V_a V_b T$	$V_a V_b -T$	$V_a V_b --T$
Úmido	$+V_a V_b ++T$	$+V_a V_b +T$	$+V_a V_b T$	$+V_a V_b -T$	$+V_a V_b --T$
Muito Úmido	$V_a +V_b ++T$	$V_a +V_b +T$	$V_a +V_b T$	$V_a +V_b -T$	$V_a +V_b --T$
Perigosamente Úmido	$+V_a +V_b ++T$	$+V_a +V_b +T$	$+V_a +V_b T$	$+V_a +V_b -T$	$+V_a +V_b --T$

Tabela 23: Transformação das regras, onde: V_b – Vazão de barbotina; V_a – Vazão de ar aquecido; e T – Temperatura do ar



R1	→	<valor menor que 4.00>	→	Perigosamente Seco
R2	→	<4.00, 4.25, 4.00, 4.75>	→	Muito Seco
R3	→	<4.75, 5.50, 4.25, 6.00>	→	Seco
R4	→	<6.00, 7.00, 5.50, 7.50>	→	Normal
R5	→	<7.50, 8.25, 7.00, 8.75>	→	Úmido
R6	→	<8.75, 9.00, 8.25, 9.00>	→	Muito Úmido
R7	→	<valor maior que 9.00>	→	Perigosamente Úmido

Figura 67: Definição das regras para a umidade.



R8	→	<valor menor que 400>	→	Muito baixo
R9	→	<400, 410, 400, 430>	→	Baixo
R10	→	<430, 460, 410, 480>	→	Normal
R11	→	<480, 500, 460, 500>	→	Alto
R12	→	<valor maior que 500>	→	Muito Alto

Figura 68: Definição das regras para a temperatura.

Podem ser indicadas as implicações de Mamdani ou Larsen entre outros (BOUCHON-MEUNIER, 1993). No caso específico optou-se por Larsen, embora este não generalize toda a implicação clássica. Mas as conjunções empregadas por ele, em razão da utilização no controle difuso, podem servir para implicações difusas pois levam consideração condições particulares inerentes ao controle.

$$f_{RP}(x, y) = f_A(x) \times f_B(y) \rightarrow \text{Larsen}$$

Porém a melhor forma de acompanhar o raciocínio é seguir um exemplo de como é realizado o cálculo do centro de massa (resposta) para uma determinada umidade e temperatura, considerando ainda a vazão do ar e da barbotina neste determinado momento.

Considerando assim, que em um determinado momento, a temperatura T é de 469.00°C , a umidade U é de 4.6% , a vazão do ar V_a é de $0.5450\text{m}^3/\text{s}$, e a vazão da barbotina V_b é de $0.0230\text{m}^3/\text{s}$. E sobre estes valores serão aplicados os conceitos e regras definidos para este trabalho.

Inicialmente vamos calcular o valor de μ para cada faixa de umidade e de temperatura.

$$\left. \begin{matrix} m_{\text{MuitoSeco}}[U \leq 4.5] = 1 \\ m_{\text{Seco}}[U > 6.5] = 0 \end{matrix} \right\} U = 4.6 \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} m_{\text{MuitoSeco}}[4.6] = 0.75 \\ m_{\text{Seco}}[4.6] = 0.25 \end{matrix} \right.$$

$$\left. \begin{matrix} m_{\text{Normal}}[T \leq 460] = 1 \\ m_{\text{Alto}}[T > 480] = 0 \end{matrix} \right\} T = 469 \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} m_{\text{Normal}}[469] = 0.75 \\ m_{\text{Alto}}[469] = 0.25 \end{matrix} \right.$$

Recorrendo a tabela de Regras (tabela 23), verificamos que:

UMIDADE	TEMPERATURA DO AR				
	muito baixo	Baixo	Normal	Alto	muito alto
Perigosamente Seco	$-V_a - V_b ++T$	$-V_a - V_b +T$	$-V_a - V_b T$	$-V_a - V_b -T$	$-V_a - V_b --T$
Muito Seco	$V_a - V_b ++T$	$V_a - V_b +T$	$V_a - V_b T$	$V_a - V_b -T$	$V_a - V_b --T$
Seco	$-V_a V_b ++T$	$-V_a V_b +T$	$-V_a V_b T$	$-V_a V_b -T$	$-V_a V_b --T$
Normal (ideal)	$V_a V_b ++T$	$V_a V_b +T$	$V_a V_b T$	$V_a V_b -T$	$V_a V_b --T$
Úmido	$+V_a V_b ++T$	$+V_a V_b +T$	$+V_a V_b T$	$+V_a V_b -T$	$+V_a V_b --T$
Muito Umido	$V_a +V_b ++T$	$V_a +V_b +T$	$V_a +V_b T$	$V_a +V_b -T$	$V_a +V_b --T$
Perigosamente Umido	$+V_a +V_b ++T$	$+V_a +V_b +T$	$+V_a +V_b T$	$+V_a +V_b -T$	$+V_a +V_b --T$

Desta forma, para a umidade de 4.6% e a temperatura de 469.00°C estarão atuando as seguintes regras com os seus devidos pesos:

$$\mu \text{ para Temperatura Normal} = 0.75$$

$$\mu \text{ para Temperatura Alta} = 0.25$$

$$\mu \text{ para Umidade Muito Seca} = 0.75$$

$$\mu \text{ para Umidade Seca} = 0.25$$

O que nos leva a seguinte ação sobre o sistema:

$0.75 \times 0.75 (V_a - V_b T)$	$0.75 \times 0.25 (V_a - V_b -T)$
$0.75 \times 0.25 (-V_a V_b T)$	$0.25 \times 0.25 (-V_a V_b -T)$

Assim, a resposta ao sistema será dada pela composição das regras com os seus pesos (centro de gravidade para obter a solução):

C.G. da resposta para ação sobre a temperatura (T):

$$\frac{0.5625(T) + 0.1875(T - 0.1T) + 0.1875(T) + 0.0625(T - 0.1T)}{0.5625 + 0.1875 + 0.1875 + 0.0625}$$

$$\frac{0.5625(T) + 0.1875(T - 0.1T) + 0.1875(T) + 0.0625(T - 0.1T)}{1} = 0.975T$$

C.G. da resposta para ação sobre a Vazão de ar (V_a):

$$\frac{0.5625(V_a) + 0.1875(V_a) + 0.1875(V_a - 0.1V_a) + 0.0625(V_a - 0.1V_a)}{0.5625 + 0.1875 + 0.1875 + 0.0625}$$

$$= \frac{0.5625(V_a) + 0.1875(V_a) + 0.1875(V_a - 0.1V_a) + 0.0625(V_a - 0.1V_a)}{1} = 0.975V_a$$

C.G. da resposta para ação sobre a Vazão de barbotina (V_b):

$$\frac{0.5625(V_b - 0.1V_b) + 0.1875(V_b - 0.1V_b) + 0.1875(V_b) + 0.0625(V_b)}{0.5625 + 0.1875 + 0.1875 + 0.0625}$$

$$= \frac{0.5625(V_b - 0.1V_b) + 0.1875(V_b - 0.1V_b) + 0.1875(V_b) + 0.0625(V_b)}{1} = 0.925V_b$$

ou seja, o valor da vazão de barbotina deve ser reduzido em 7.5% passando de 0.0230m³/s para 0.0213m³/s, o valor da vazão de ar deve ser reduzido em 2.5% passando de 0.5450m³/s para 0.5314m³/s, e o da temperatura deve ser reduzido em 2.5% passando de 469.00°C para 457.28°C.

5.3 O SOFTWARE EMPREGADO NA DEMONSTRAÇÃO DA SOLUÇÃO

O software de aquisição de dados baseado em ambiente Windows "HP VEE" (Ambiente de Engenharia Visual), desenvolvido pela empresa Hewlett Packard, é uma linguagem de programação visual para o desenvolvimento de programas de controle de instrumentos e aquisição de dados. Com ele é possível criar um programa visual, simplesmente unindo objetos funcionais para formar um diagrama de blocos, e por isto é considerado uma "Linguagem de Programação Gráfica" para desenvolver programas de teste.

O HP VEE produz uma redução dramática do tempo de desenvolvimento de testes pois, o programador conectará ícones no lugar de escrever linhas de código. O programa resultante é rememorativo e na forma de diagrama de blocos, podendo ser executado como um programa que foi escrito em uma linguagem de alto nível como o "C".

Poderosas características de depuração, agregadas ao programa, que além de permitirem a visualização dos dados em uma linha particular, também possibilitam fixação de pontos de parada.

O alcance das funções dentro do HP VEE, o transforma em uma ferramenta universal para realizar medições e para programas de controle.

O HP VEE provê à matemática e as funções de análise que percorrem desde o cálculo elementar até as funções do tipo real/complexa, manuseio/conversão de dados e processamento de sinais digitais. Estão disponíveis diversos objetos, mas deve ser ressaltado o do tipo “fórmula” que permite a construção de equações complexas, e o do tipo “sequencer” permite tomar decisões com nos dados adquiridos.

A lista de operadores disponibilizados pelo HP VEE é mostrada abaixo

- Aritmética
- Tarefa
- Comparação
- Lógica

A lista de funções disponibilizadas pelo HP VEE é mostrada abaixo

- Matrizes
- Bessel
- Bitwise
- Cálculo
- Partes Complexas
- Filtragem de Dados
- Geração
- Matrizes
- Panel
- Funções de força
- Probabilidade e Estatística
- Partes Reais
- Processamento de Sinal
- String
- Informações de sistema
- Funções de Polinômio
- Funções do tipo Trig

O HP VEE é completamente compatível com Computadores com cartões para aquisição de dados trabalhando em plataformas Windows 3.1 e 95. Desenvolvendo seus testes e aplicações de medição utilizando o HP VEE em Computadores com estas características de hardware, você economizará dinheiro e poderá acelerar seu tempo de desenvolvimento.

Este tipo de programa pode ser empregado de forma satisfatória na aquisição de dados através de instrumentos e por módulos *plug-in* para PC; no controle de interfaces e equipamentos (serial, HP-IB ou GPIB, VXI); na exposição do dados, empregando muitas formas diferentes de representar graficamente, exibições alfanuméricas, e objetos de exibição; no carregar e utilizar controles ActiveX para acrescentar funcionalidade; na comunicação com outros programas Windows que empregam automatização com controles ActiveX; para salvar programas em diversos formatos como por exemplo o binário, o ASCII, etc.; no processamento de dados na forma de strings, arranjo, bytes, registros, etc.; Processar, analisar e simular a de adição simples a FFTs, ajuste, integração, etc.; Trabalhar em Loop como if/then/else, <, =,>, para, enquanto, repita até, etc.; Controlar e regular para simular dados, medições e processamento de variáveis de saída, etc.; Criação de programas estruturados e interfaces com o usuário; Acesso de qualquer interface do HP VEE com a Rede Mundial WWW.

5.4 O APLICATIVO DESENVOLVIDO COM HP VEE PARA A SOLUÇÃO

A documentação completa do aplicativo desenvolvido com o HP VEE encontra-se no Anexo1. Porém, a seguir será apresentado a forma como o aplicativo trata uma informação e emite uma ação a ser realizada.

Deve ser ressaltado neste ponto que o aplicativo é apenas um simulador e por não haver sido ainda empregado no controle efetivo de um secador por atomização, não existe até o momento uma base de dados sobre o que foi colhido de valores de umidade, temperatura, vazão do ar e vazão de barbotina. Como também ainda não existe uma base de dados sobre as ações tomadas no seu controle.

Para substituir a unidade de aquisição de dados foi criado um gerador de valores aleatórios para funcionar como uma entrada de dados no aplicativo. O funcionamento deste é bastante simples, pois através da definição de valores de máximo e mínimo para cada uma das entradas (Umidade, Temperatura, Vazão de Ar e Vazão de Barbotina) é gerado um valor aleatório por uma função Randômica. Desta forma, quando é pressionado o botão "INICIAR", serão gerados valores aleatórios para a umidade, temperatura, vazão de ar e vazão de barbotina dentro do intervalo de valores definidos para cada uma das variáveis.

A geração destes valores de forma aleatória pode levar a situações muito pouco convencionais de valores a serem tratados, muitas vezes fugindo em muito de valores que seriam obtidos na realidade. Porém este é um fator que corrobora para validar o aplicativo, uma vez que deverá testá-lo para as situações mais esdrúxulas que podem ocorrer. A forma destes geradores podem ser observados na figura 69.

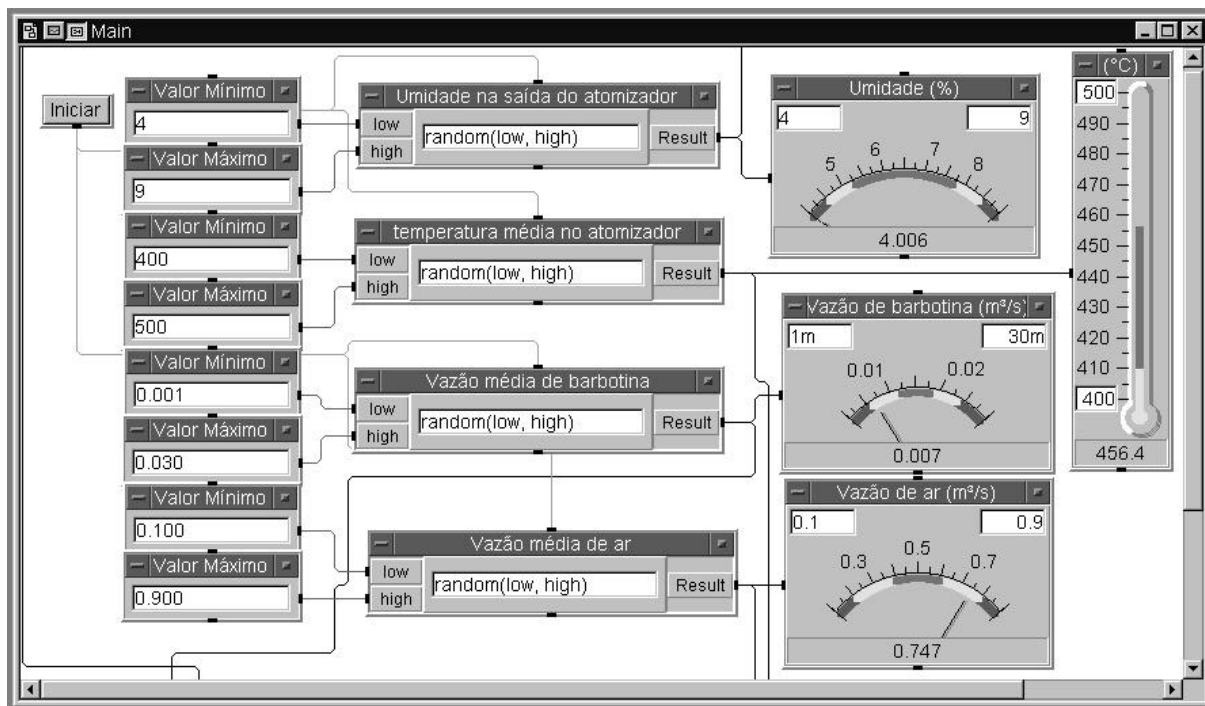


Figura 69: Geradores de valores para a Umidade, Temperatura, Vazão média de ar e barbotina

Os valores que foram gerados seguem dois caminhos, o primeiro é o da sua exposição de uma forma apropriada para a sua visualização. O segundo caminho é o do tratamento destes valores de uma forma apropriada para que sejam tomadas as ações necessárias. Ações estas, que tem por objetivo atingir as metas definidas pelas regras difusas.

Estas regras difusas estão definidas nos objetos “SEQUENCER” e cada ação está presente através do seu respectivo objeto “SEQUENCER TRANSACTION”. Desta forma existe um objeto “SEQUENCER” para cada resultado esperado, definidos com “Verifica valor da Umidade e informa nova Temperatura” (figura 70a), “Verifica valor da Umidade e da Temperatura informa nova Vazão de Ar” (figura 71a) e “Verifica valor da Umidade e da Temperatura informa nova Vazão de Barbotina” (figura 71b).

Dentro de cada objeto SEQUENCER estão presentes diversos testes, cada um destes testes é definido por um SEQUENCER TRANSACTION, que nada mais é do que a

seqüência de ações definidas pela lógica difusa para controlar um determinado evento. Na figura 70b pode ser visualizado SEQUENCER TRANSACTION referente a verificação da umidade.

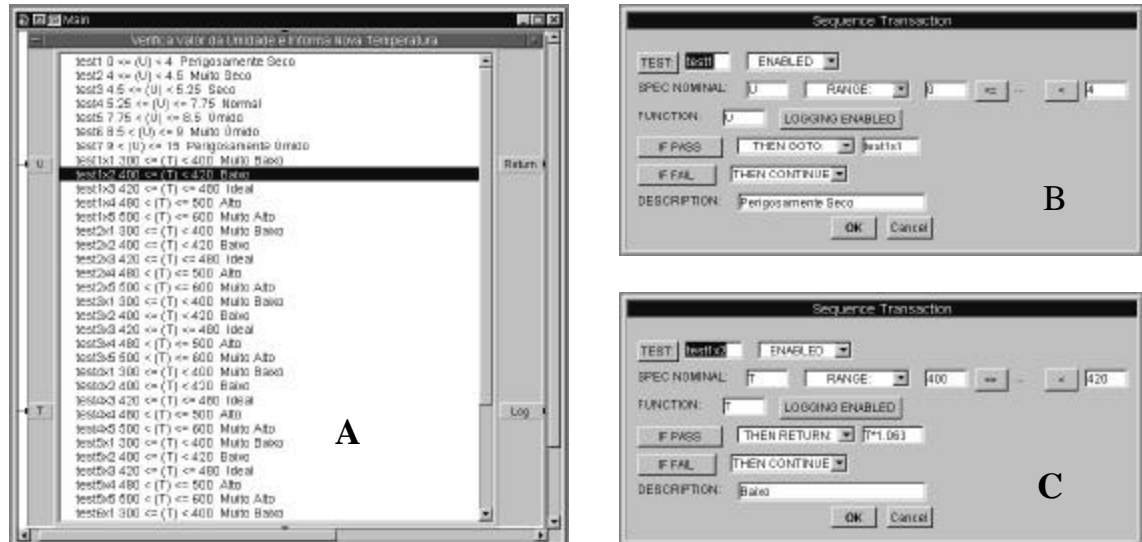


Figura 70: O SEQUENCER "Verifica valor da Umidade e informa Nova Temperatura, acompanhados dos SEQUENCER TRANSACTION da Umidade e da Temperatura.

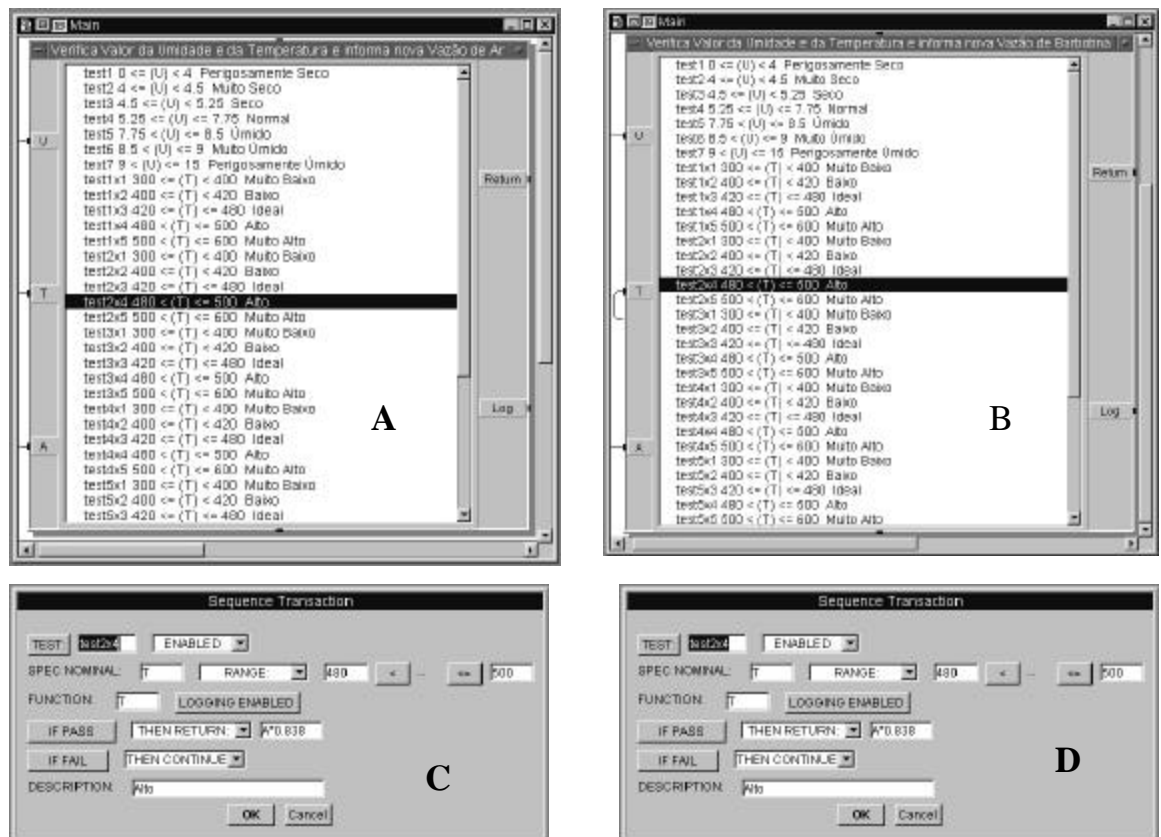


Figura 71: Os SEQUENCER que verificam o valor da Umidade e da Temperatura e informam os novos valores da Vazão do ar (A) e da Vazão de barbotina (B), acompanhados dos respectivos SEQUENCER TRANSACTION

Na figura 70C pode ser visualizado SEQUENCER TRANSACTION referente a verificação da temperatura com uma ação efetiva sobre a mesma, já na figura 71C pode ser visualizado SEQUENCER TRANSACTION referente a uma ação efetiva sobre a vazão de ar, e na figura 71D pode ser visualizado SEQUENCER TRANSACTION referente a uma ação efetiva sobre a vazão de barbotina.

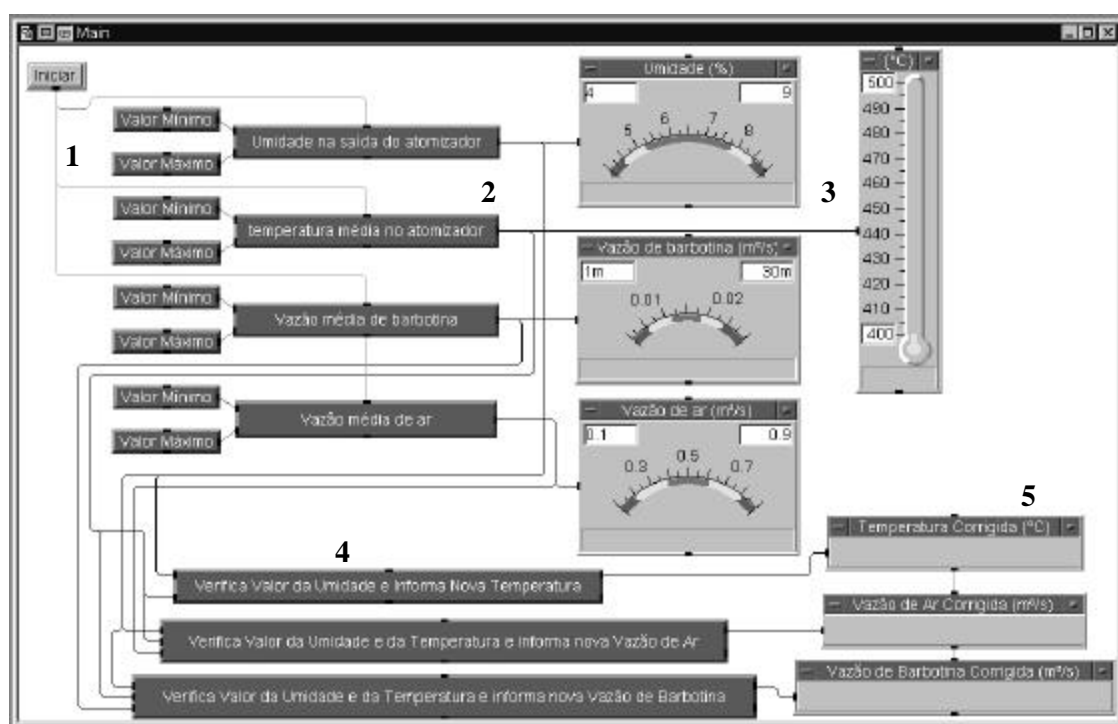


Figura 72: Visualização do aplicativo antes da sua execução.

Uma visão completa do aplicativo antes dele ser executado pode ser observado na figura 72. Nela, todos os objetos se encontram na forma de ícones. Os objetos estão nesta forma pois esta é uma forma de acelerar a execução do aplicativo. Na área 1 da figura 72 podem ser visualizados o botão “INICIAR” e as entradas de Valores Máximo e Mínimo dos geradores aleatórios de valores (área 2 – Figura 72); na área 3 podemos visualizar os objetos de exposição dos valores gerados; na área 4 encontram-se os objetos SEQUENCER; e na área 5 os objetos de exposição destes SEQUENCER. E da mesma forma, na figura 73

podemos observar o mesmo aplicativo, porém na sua forma de apresentação ao usuário do mesmo.

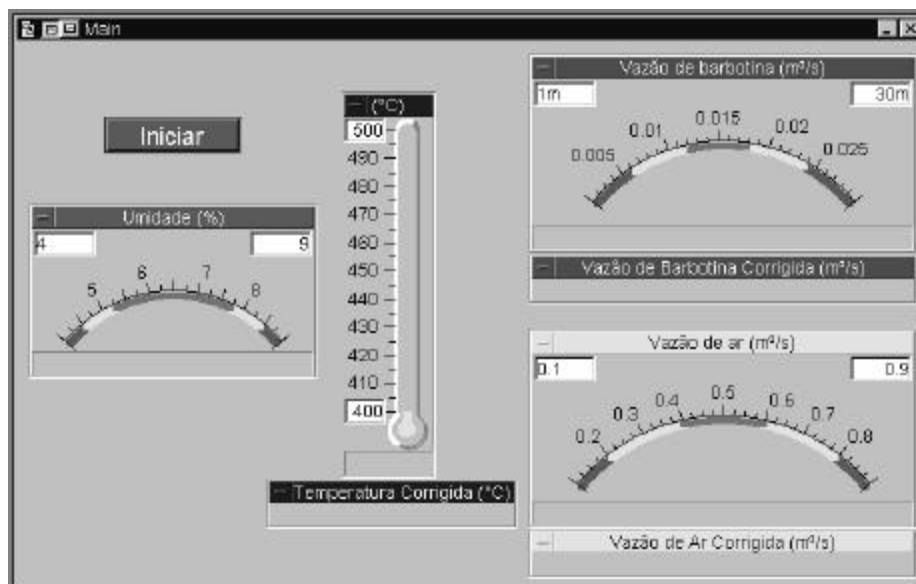


Figura 73: Visão do usuário do aplicativo antes da sua execução

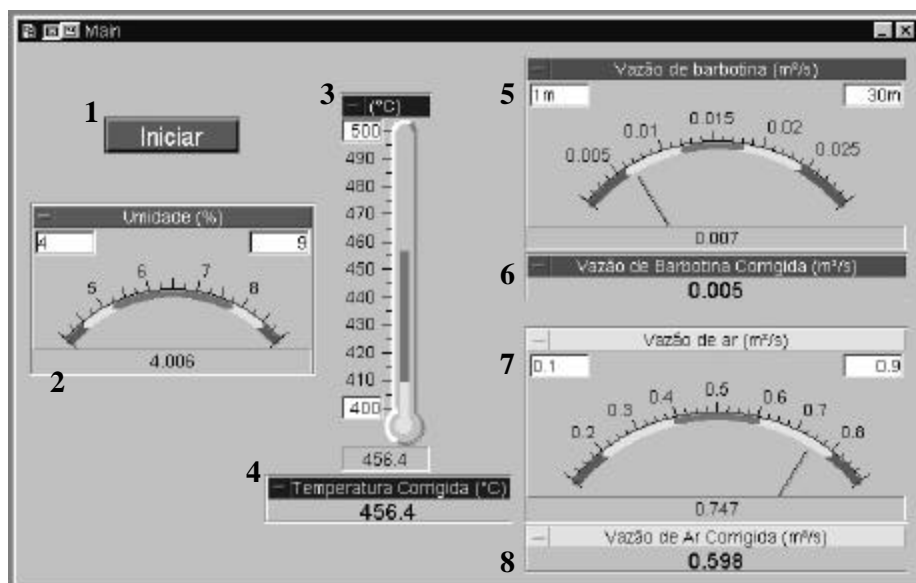


Figura 74: Visão do usuário do aplicativo após sua execução

Na figura 74 é possível observar a visão do usuário após a execução do aplicativo, ou seja, quando depois de pressionar o botão INICIAR (fig.74-1) serão gerados os valores aleatórios para Umidade (fig.74-2), temperatura (fig.74-3), vazão de barbotina (fig.74-5) e da vazão do ar (fig.74-7). Logo a seguir estes valores são processados e os valores resultantes da temperatura corrigida (fig.74-4), da vazão de barbotina corrigida (fig.74-6) e da vazão de ar

corrigida (fig.74-8) são exibidos. E estes são os valores que deverão ser informados ao sistema de secagem por atomização para corrigir a sua atuação segundo as regras definidas na tabela 23.

Na figura 75 é apresentada, de forma semelhante a figura 72, uma visão completa do aplicativo sendo executado.

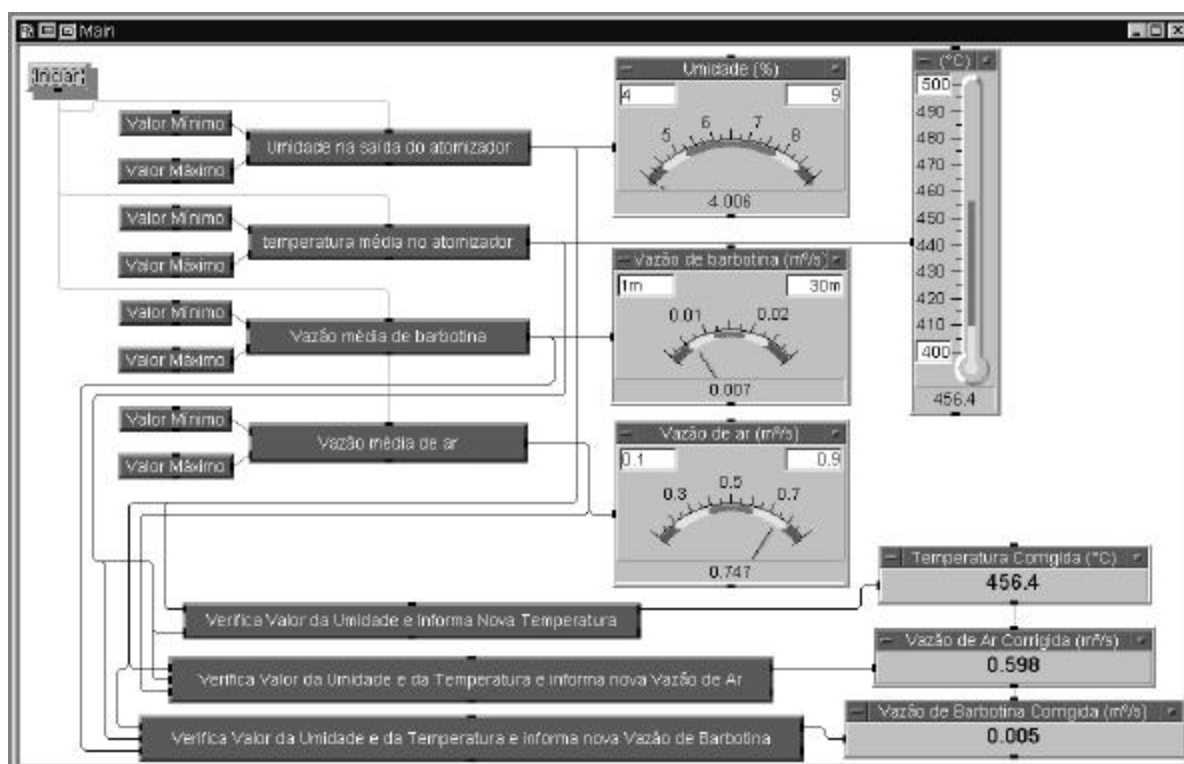


Figura 75: Visualização do aplicativo após sua execução.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E ENCAMINHAMENTOS

Este trabalho tem como objetivo contribuir com a melhora da qualidade nas indústrias de pavimento e revestimento cerâmico. E para isto foi realizado uma ampla avaliação do processo de secagem por atomização que é parte integrante do ciclo de produção empregado nestas indústrias. A etapa de secagem é realizada após a

cominuição (moagem) e homogeneização da massa cerâmica, e tem por finalidade capital conferir ao produto características físicas de transporte e perfeito preenchimento da matriz de compactação.

No caso do controle do processo aplicado à secagem por atomização é uma exigência que a aquisição de dados seja realizada durante todo o ciclo produtivo. Estes dados possuem duas utilizações, uma imediata e outra a longo prazo. O efeito imediato desta aquisição é a possibilidade de intervir rapidamente cada vez que o ciclo produtivo não se comporta conforme as especificações exigidas, intervenção que permite reduzir as perdas e, portanto, uma diminuição do custo unitário de produção. No caso do controle a longo prazo, os dados coletados não devem ser descartados, mas sim utilizados para constituir a “*memória técnica*” da empresa, enriquecendo seu patrimônio técnico e intelectual. O qual representa uma base partida imprescindível para a criação de inovações tecnológicas e é estratégico para os que querem ter uma produção de vanguarda.

A evolução do trabalho de pesquisa ocorreu em diversas fases, que tinham sempre como objetivo o controle efetivo do secador por atomização empregando a lógica difusa como padrão na tomada de decisão. Desta maneira, a fase inicial foi a Identificação do Problema seguida, concomitantemente, dos Ensaio de Avaliação que tinham por objetivo constatar a necessidade da pesquisa, e da Revisão Bibliográfica onde foi feito um completo levantamento dos trabalhos publicados sobre a secagem por atomização e sobre a lógica difusa aplicada ao controle de processo.

Na fase de Análise dos Ensaio é avaliada a possibilidade do emprego da lógica difusa neste tipo de processo, neste ponto também é considerado o emprego da lógica convencional como forma de solução do problema.

Na fase da Coleta das Informações Morfológicas, foram levantados os dados empíricos empregados nos setores de produção e de controle da etapa de secagem por atomização.

Na fase onde a Lógica Difusa é aplicada ao Processo de secagem por Atomização são agrupadas e tratadas todas as informações oriundas das fases anteriores para, na fase seguinte, ser apresentada uma Solução do Problema.

6.1 AS LIMITAÇÕES DO PROCESSO

O processo de controle de um atomizador na atualidade está baseado em 4 (quatro) pontos principais (controle da temperatura de entrada e da vazão do gás de secagem; controle da vazão do fluido a ser secado; controle de umidade do produto secado) que são controlados

manualmente por um operador. E a proposta deste trabalho é a realização de um controle sobre este processo, sobre o qual é necessário que sejam aplicados alguns ensaios. Assim, no controle da temperatura de entrada do gás de secagem é realizada a verificação da temperatura utilizando-se termopares e o controle da sua vazão dentro dos dutos que levam este gás até a câmara de atomização. No controle da vazão do fluido a ser secado é realizada a verificação pelo controle de vazão da bomba de recalque. No controle de umidade do produto secado é realizada a verificação de sua umidade, através de amostras coletadas de forma contínua na saída do atomizador.

No controle da temperatura reside a primeira limitação do processo, pois é muito difícil obter um consenso sobre como e onde devem ser colocados os termopares, assim recorre-se ao adotado tradicionalmente, para no futuro, com um controle já atuando, realizar alterações e avaliar a sua influência.

A Segunda limitação é aonde realizar a avaliação da vazão tanto do gás aquecido para realizar a secagem como do fluido a ser secado, pois as perdas de carga sempre estarão presentes no processo.

A terceira limitação está presente no local onde é realizada a avaliação da umidade do produto que já foi seco, ou seja, onde deve ser posicionado o equipamento de coleta de dados de umidade.

Em todos os casos, o importante é a realização de um primeiro estudo e logo após realizar as alterações que forem pertinentes, sempre comparando estes resultados com os ensaios tradicionais. Quando uma memória técnica estiver formada, o processo assume todos os controles sobre as suas variáveis, tomando-o robusto na sua ação.

A repetibilidade é uma característica interessante, principalmente quando é necessário migrar padrões definidos em laboratório para uma planta piloto ou mesmo para uma linha tradicional de produção. Com esta característica é possível avaliar uma determinada situação em laboratório e depois de algumas transformações, esta possa ser empregada na linha de produção.

Os valores definidos pela literatura e empregados na simulação de uma proposta são deformados pelas condições de contorno empregadas na solução. Da mesma forma, quando um ensaio foi realizado para o processo de secagem por atomização para as escalas laboratorial, piloto e industrial, os resultados obtidos são completamente diferentes. E para este caso, também não foi possível determinar padrões de repetibilidade para os diferentes tipos de ensaios. Deixando patente desta forma, a dificuldade na criação de valores confiáveis de migração de resultados de um processo para o outro.

Como o controle deste processo é realizado de forma empírica, e as informações de atuação nas características do processo são todas linguísticas, é de fundamental importância que seja utilizado a lógica difusa como ferramenta de auxílio à tomada de decisão e na modelagem do sistema de controle. Uma vez que, na atualidade, a lógica difusa é uma das melhores alternativas para o auxílio à tomada de decisão neste tipo de problema. Ressaltando que este é empregado, porque não se conhece um modelo matemático que funcione a contento por sua complexidade; porque certas partes do sistema a controlar são de difícil avaliação (processo químico) com medidas pouco confiáveis (erros e tolerância); porque existe a presença de várias incertezas; porque mesmo sendo este um sistema complexo e não existindo um modelo para o seu controle, o comportamento do operador é expressado linguisticamente, na forma de condições e ações; porque existem processos de ajuste - desajuste: uma ação de controle pode indiretamente desajustar um parâmetro estável anteriormente.

6.2 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO

Como foi demonstrado ao longo de todo este trabalho, as soluções propostas pelos mais diferentes meios não possuem a característica da repetibilidade, considerada fundamental para as indústrias que utilizam o processo de secagem por atomização no seu processo de produção de produtos acabados.

Com estas constatações, ficou evidenciada a necessidade da criação de um modelo que realize o controle do equipamento utilizado no dito processo. Uma vez que é de extrema valia para este tipo de processo produtivo, que as falhas de produção sejam minimizadas, e que exista uma atuação rápida quando da alteração de qualquer característica do produto.

Os componentes necessários para a implementação da operação assistida pelo novo controle do secador por atomização são: termopares colocados em pontos estratégicos ao longo do percurso, com os quais poder-se-á verificar as perdas e oscilações de temperaturas ao longo do equipamento; equipamento para medir a vazão dos gases aquecidos, colocado o mais próximo possível (em função do desenho do equipamento) da entrada destes gases no atomizador; equipamento para controlar a vazão/emissão do gás de aquecimento; equipamento para medir a vazão do fluido a ser atomizado colocado o mais próximo possível do bico de atomização; equipamento para controlar a vazão do fluido colocado após a bomba de recalque (ou após os filtros, caso existirem); equipamento para análise "on-line" da umidade

do produto secado na unidade de atomização; microprocessador com condições de analisar os dados emitidos pelos equipamentos, e ao mesmo tempo poder exercer um controle efetivo sobre o processo, em função de padrões previamente definidos pela lógica difusa.

Assim quando o gás que é aquecido em uma unidade específica para este fim, locomove-se em direção ao atomizador e próximo de sua liberação, ou seja, momentos antes dele entrar na câmara de secagem é realizada uma verificação da sua vazão. O seu valor é comparado com parâmetros previamente definidos pelo sistema de controle, e em função dos padrões necessários ao processo este poderá ativar uma ação de correção.

O fluido (denominado barbotina) que está armazenado nas “vascas” também é conduzido para o interior do atomizador, a sua vazão pode ser controlada e o seu valor é monitorado constantemente. E da mesma forma que o gás de secagem, o seu valor também é comparado com parâmetros previamente definidos pelo sistema de controle, e em função dos padrões necessários ao processo este poderá ativar uma ação de correção.

Quando a operação de atomização estiver concluída, o produto gerado por este processo passará por um analisador de umidade, que envia seus valores para o sistema de controle de forma que este possa avaliar a sua coerência com os valores de controle. Quando tais valores oscilarem, o sistema de controle irá restaurar os valores ótimos da forma mais conveniente para o processo. O sistema atuará de forma que se restaurem tais valores previamente estabelecidos, influenciando na vazão dos equipamentos. Este também atuará de forma que o perfil de temperaturas dentro do atomizador esteja dentro dos padrões necessários.

6.3 RESULTADOS

O emprego do software de aquisição de dados baseado em ambiente Windows “HP VEE”, é um dos fatores de ganho. Por ser uma linguagem de programação visual específica para o desenvolvimento de programas de controle de instrumentos e aquisição de dados. com ele é possível criar um programa visual, simplesmente unindo objetos funcionais para formar um diagrama de blocos.

O HP VEE produz uma redução dramática do tempo de desenvolvimento de testes pois, o programador conectará objetos no lugar de escrever linhas de código. O programa resultante é rememorativo e na forma de diagrama de blocos, podendo ser executado como um programa que foi escrito em uma linguagem como o “C”. E o alcance das funções dentro do HP VEE, o transforma em uma ferramenta universal para realizar medições e para programas de controle.

Assim, a modelagem de um sistema de controle por lógica difusa empregado na secagem por atomização de produtos cerâmicos utilizando o software HP VEE com as suas funções de análise e controle difuso permitem a tomada de decisões com nos dados adquiridos na linha de produção.

Com o emprego deste tipo de modelagem em uma linha de produção que utilize a secagem por atomização, é esperado que ocorram: ganhos energéticos significativos, pela otimização do controle de temperaturas; tempos menores de armazenagem para homogeneização do produto, pela garantia da uniformidade do produto atomizado; redução substancial de tempos de produção, uma vez que exista a uniformidade de umidade no produto, este necessitará apenas uniformizar a umidade no interior do grânulo repercutindo em tempos menores de estocagem.

6.4 SUGESTÕES E ENCAMINHAMENTOS

A criação de um sistema de controle por lógica difusa poderá ser o ponto de partida para um reestudo dos sistemas de controle hoje empregados nas indústrias deste setor. Um bom exemplo disto é o controle das prensas, onde será possível avaliar a ação e o preenchimento dos moldes, selecionando os produtos fora de padrão para o reprocessamento; o controle efetivo dos equipamentos de secagem do biscoito prensado que deverá garantir uma maior resistência ao manuseio; o controle do processo de esmaltação evitando perdas dos produtos nele empregados; o controle da curva de queima do forno, onde com uma ação efetiva existe a possibilidade otimizar o gasto energético e garantir oscilações de temperatura mais suaves; unido tudo ao processo de seleção e escolha, que hoje já sofre um controle bastante efetivo.

É interessante também ressaltar que entre as vantagens que este tipo de controle nos fornece podem ser destacadas: que o tempo de formação de pessoal de projeto de controladores é muito curto, e não existir a necessidade de um domínio profundo dos fundamentos teóricos; que não é necessário que exista de um modelo matemático preciso do ente a ser controlado; que os controladores difusos alcançam, em muitas aplicações, mais rápido a estabilidade nas etapas transitórias; que existe uma alta tolerância ao ruído e a variações do sistema controlado; e que estes são facilmente reconfiguráveis, agregando ou retirando regras.

Todo este procedimento deverá levar, no futuro, a uma linha de produção bastante automatizada, que tenha baixas perdas de produto por produtos desconformes e

com alta qualidade final, ressaltando neste ponto a economia gerada pela redução das perdas e os ganhos ocasionados pela memória armazenada sobre a produção de um determinado tipo de produto. Produto este, que poderá ser posto em produção a qualquer momento e com um curto espaço de tempo para que toda a unidade fabril tenha atingido os níveis de qualidade requeridos.

REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARO, J.L.A., FUENTES, A.B., NAVARRO, J.E.E. E BENLLOCH, A.E.; *Estudio de la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento. (I) Influencia del tamaño de gránulo de atomizado*; **Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.**, 21(1), 245-250, 1982.
- ALBARO, J.L.A., BENLLOCH, A.E., PORCAR, V.B. E NAVARRO, J.E.E.; *Control de la compactación durante el proceso de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos*; **Técnica Cerámica**, 118, 1307-1314, 1983.
- ALBARO, J.L.A., BENLLOCH, A.E., PORCAR, V.B. E NAVARRO, J.E.E.; *Quality control in tile production*; **Interceram**, 33(2), 50-54, 1984.
- ALBARO, J.L.A., MENDALL, F.N., VARGAS, V.B. E MINGARRO, C.F.; Método de determinación de las características tecnológicas de aglomerados. (I) Métodos de determinación de la fluidez y de la densidad aparente; **Técnica Cerámica**, 146, 380-386, 1986.
- ALBARO, J.L.A., PORCAR, V.B., FUENTES, A.B., NAVARRO, J.E.E., BENLLOCH, A.E. & MENDALL, F.N.; Estudio de la Compactación de soportes cerámicos (bizcochos) de Pavimentos y Revestimientos Cerámicos. II. Influencia de la presión y humedad de prensado; **Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.**, 22(1), 9-18; (1983).
- ALBARO, J.L.A., PORCAR, V.B., FUENTES, A.B., NAVARRO, J.E.E., BENLLOCH, A.E. E MENDALL, F.N.; *Defectos de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos*; **Ed. AICE-ITC**, Castellon de la Plana-España, IMPIVA; 1991.
- ANVARI, M. & ROSE, G.; *Fuzzy Relational Databases*; **J.C. Bezdek ed**, The Analysis of Fuzzy Information Vol. II pp. 203-211, CRC Press, 1987.
- BAGÁN VARGAS, V.; *Efecto de las condiciones de operación, en las distintas etapas del proceso, sobre las propiedades y características del pavimento de muy baja porosidad*; Tesis Doctoral - Departament d'Enginyeria Química - **Universitat de València** - España (1991).

- BALDWIN, J.F.; *A new approach to approximate reasoning using a fuzzy logic*; **Fuzzy Sets and Systems**, Vol. 2 pp. 309-325, 1979.
- ____; *Knowledge Engineering using a Fuzzy Relational Inference Language*; **E. Sanches & M. Gupta eds.** Proc. Of IFAC Conference on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Processes pp. 15-20, Marseille, 1983.
- BARONE, J.; *A fuzzy method for window size selection in texture analysis*, 4th. Int. Fuzzy Systems Association World Congress, 4th. **IFSA'91**; Brussels, pp 17-20, 1991.
- BELLMAN, R.E. E ZADEH, L.A.; *Decision making in a fuzzy environment*; **Management Science** **17**, B141-B164, 1970.
- BELLMAN, R.E., KALABA, R. E ZADEH, L.A.; *Abstraction and Pattern Classification*; **Journal of Mathematical Analysis and Applications** **13**, 1-7, 1966.
- BELTRÁN PORCAR, V., ESCARDINO BENLLOCH, A., FELIÚ MINGARO, C. E RODRIGO, M.D.; *Liquid suction by porous ceramic materials*; **Br. Ceram. Trans. J.**, 87, 64-69, 1988.
- BELTRÁN PORCAR, V., BARBA, A., JARQUE, J.C. E ESCARDINO BENLLOCH, A.; *Liquid suction by porous ceramic materials: 3. Influence of the nature of the composition and the preparation method of the pressing powder*; **Br. Ceram. Trans. J.**, 90, 77-80, 1991.
- BEYTH-MAROM, R.; *How Probable is Probable? A Numerical Taxonomy Translation of Verbal Probability Expressions*; **Journal of Forecasting**, Vol. 1, pp 257-269, 1995.
- BLASCO FUENTES, A., AMORÓS ALBARO, J.L., SANCHO-TELLO, M. E BELTRAN PORCAR, V.; *Estudio de los costes de producción y de la inversión en plantas de pavimentos de gres de monococción por vía seca y por vía húmeda. 1^ª parte*; **Técnica Cerámica**, 116, 1208-1225, 1983.
- BLASCO FUENTES, A., AMORÓS ALBARO, J.L., SANCHO-TELLO, M. E BELTRAN PORCAR, V.; *Estudio de los costes de producción y de la inversión en plantas de pavimentos de gres de monococción por vía seca y por vía húmeda. 2^ª parte*; **Técnica Cerámica**, 117, 1266-1274, 1983.
- BOSC, P.; GALIBOURG, M. & HAMON, G.; *Fuzzy Querying with SQL: Extension and Implementation Aspects*; **Fuzzy Sets and Systems**, Vol.28, pp. 333-349, 1988.
- BOUCHON-MEUNIER, B.; *La Logique Floue*; **Presses Universitaires de France**, nr 2702, 1993.
- BRAUER, H.; *Stoffaustausch Einschiesslich Chemischer Reaktionen*; (1971)
- BONNISSONE, P. & DECKER, K.; *Selecting Uncertainty Calculi and Granularity: Na Experiment in Trading-Off Precision and Uncertainty in Artificial Intelligence*; **L.N. Kanaal e J.F. Lemmer, Eds.**, North-Holland, Amsterdam, 1986.
- BUCKLES, P. & PETRY, F.E.; *A Fuzzy Representation of Data for Relational Databases*; **Fuzzy**

- Sets and Systems**, Vol. 7, pp. 213-226, 1982.
- ____; *Extending the Fuzzy Database with Fuzzy Numbers*, **Information Sciences**, 344 pp. 145-155, 1984.
- ____; *Generalized Database and Information Systems*; **J.C. Bezdek ed.**, The Analysis of Fuzzy Information Vol. II pp. 177-201, CRC Press, 1987.
- BUCKLES, P.; PETRY, F.E. & SACHAR, H.S.; *A Domain Calculus for Fuzzy Relational Databases*; **Fuzzy Sets and Systems**, Vol. 29, pp. 327-340, 1989.
- CAMPOS, I.; *Use of fuzzy logic in the selection of optimisation strategies*. In: "The Interface between Artificial intelligence and Operations Research in a Fuzzy Environment" (J.L. Verdegay. M. Delgado, Eds.), **Verlag TUV Rheinland**, ISR Series Nr. 95, 1989.
- CHANG, S.K. & KE, J.S.; *Database skeleton and its application to fuzzy query translations*; **IEEE Trans. On Software Engineering**, SE-4, 31-43, 1978.
- CHANG, C.L.; *Decision Support in an imperfect world*, **Research report**, RJ3421, 1982.
- CHARLESWORTH, D.H. & MARSHALL, W.R.; *AIChE J.*; Vol. 6, pag. 9, (1960).
- COULSON, J.M. & RICHARDSON, J.F.; *Chemical Engineering*; Vol. II, **Pergamon**, Oxford (1968).
- DLOUHY, J. & GAUVIN, W.H.; *AIChE J.*; Vol. 6, pag. 29 (1960).
- DICKINSON, D.R. & MARSHALL, W.R.; *The rates of evaporation of sprays*. **AIChE J.**; Vol. 14, pag. 541 (1968).
- DOMBROWSKI, N. & LLOYD, T.L.; *Chemical Engineering*, Vol. 8, **Pergamon**, Oxford; Vol.8, pag. 63, (1974).
- DOMBROWSKI, N. & MUNDAY, S.; *Spray Drying in Biochemical and Biological Engineering Science*; Vol. 2, **N. Blakeborough (Ed.)**, Chapt. 16. Academic Press, New York (1968).
- DRAKE, R.M.; Theoretical correlation of spray-dryer *Heat Transfer*, **Trans. ASME**, 83, 170 (1961).
- EISENKLAM, P.; Arunachalam, S.A. & Weston, J.A.; *Evaporation rates and drag resistance of burning drops*, In. **11th International Symposium on Combustion**; Pittsburgh, p.715 (1967).
- ENRIQUE NAVARRO, J.E.; *Sviluppi nelle metodologie di controllo dei processi ceramici*; **Cultura Cerámica**, 4, 39-42, 1987.
- FEDER, A.; *Charts provide quick way to radiant heat transfer*. **Chem. Eng.**; Vol. 66 n.19, pag. 159, 21 sept. (1959).
- FELIX, R.; *Entscheidungen bei qualitativen Zielen*; Dissertation, Fachbereich Informatik, **Universitat Dortmund**, 1991.
- FELIZ, R.; MOGARA, C. & REUSCH, B.; *Reasoning with Uncertainty in the Knowledge*

- Engineering Environment KEE*; **Proc. 2nd. Int. Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks**, 273-276, Lisuka, Japan, 1992.
- FORD, R.E. & FURMIDGE, C.G.L.; *The formation of drops from viscous water-in-oil emulsions sprayed through from-jet nozzles*. **Br. J. Appl. Phys.**; Vol. 68, pag. 491 (1967).
- FRASER, R.P., EISENKLAM, P. & DOMBROWSKI, N.; *Liquid atomization in chemical engineering*. **Br. Chem. Eng.**; Vol. 2, pag. 196, (1957).
- FROESSLING, N.; *The evaporation of falling drops*. **Gerlands Beitr. Geophys.**; v. 52, p.120 (1938).
- FUCHS, N.A.; *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media*; **Pergamon**, Oxford (1959).
- GAUVIN, W.H. & BALTAS, L.; *Performance predictions for a cocurrent spray dryer*. **AIChE J.**; Vol. 15, pag.764 (1969).
- GAUVIN, W.H. & KATTA, S.; *Vaporizing droplet in a spray dryer*, **AIChE J.**; Vol. 21, pag.143 (1975).
- GAUVIN, W.H. & KATTA, S.; *Vaporizing droplet performance*, **AIChE J.**; Vol. 22, pag. 713 (1976).
- GAUVIN, W.H. & DLOUHY, J.; *Can. J. Chem. Eng.*; Vol. 38, pag. 113 (1960).
- GENNO, H.; FUJIWARA, Y.; YONEDA, H. & FUKUSHIMA, K.; *Human sensory perception oriented image processing in color copy system*, **Int. Conf. On Fuzzy Logic & Neural Networks**, Lisuka, Japan, pp. 423-427, 1990.
- GLUCKERT, F.A.; *Theoretical col correlation of spray-dryer performance*. **AIChE J.**; 8, 460 (1962).
- GUPTA, M.M.; SARIDIS, G.N. & GAINES, B.R. ; *Fuzzy Automata and Decision Processes*; **North Holland**, Amsterdam, 1977.
- ICHIKAWA, A.T. & HIRAKAWA, M.; *ARES: A relational database with the capability of performing flexible interpretations of queries*, **IEEE Trans. On Software Engineering**, Vol.12 pp.624-634, 1986.
- INGEBO, R.D.; *NACA Tech. Note 2358* (1951).
- ISMAIL, M.A.; *Soft Clustering, Algorithms and validity of solutions*, **Pergamon**, Oxford 1988.
- JANDA, F.; *Calculation of the height of a drying tower weith a spraying jet for a single compound*. **Int. Chem. Eng.**; Vol. 13, pag. 649 (1977).
- JARQUE, J.C, LEZAUN, J., LÓPEZ, J.M., MALLOL, G. E MONFORT, E.; *Viabilidad técnica y económica de los procesos productivos actuales de fabricación de azulejos*; **Técnica Cerámica**, 189, 714-722; 1990.
- JOHNSTONE, H.F. & EADES, D.K.; *Vaporizations of smalls proplets*. **Ind. Eng. Chem.**; Vol. 42, pag. 2293 (1950).

- JOHNSTONE, T.A.; *PhD Thesis, University of Bradford* (1972).
- JURAN, J.M.; *Juran on Planning for Quality*, **Ed. Juran Institute, Inc.**, Connecticut; 1988.
- JURAN, J.M.; *Juran on Leadership for Quality An Executive Handbook*, **Ed. Juran Institute, Inc.**, Connecticut, 1989.
- KACPRZYK, J. & ZIOLKOWSKI, A.; *Database Queries with Fuzzy Linguistic Quantifiers*, **IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetic**, Vol.16, pp. 474-479, 1986.
- KEEY, R.B. & PHAM, Q.T.; *Chem. Eng.*; London, Vol. 311, pag. 516 (1976).
- KEEY, R.B. & PHAM, Q.T.; *Residence-time distribution of air in a tall-form spray chamber*. **Trans. Inst. Chem. Eng.**; vol. 55, pag. 114 (1977).
- KINGERY, W.D.; *Ceramic Fabrication Processes*; **Ed. John Wiley & Sons**. New York, 1957.
- LAPPLE, C.E. & SHEPHERD C.B.; *Calculation of particles*. **Ind. Eng. Chem.**; Vol. 32, pag. 605 (1940).
- LAW, C.K.; *Motion of vaporizing droplet in a constant cross flow*, **Int. J. Multiphase Flow**, Vol. 3, pag. 299 (1977).
- LEONCHIK, B.L.; *Proceedings of the 2nd Soviet Union Conference on Heat and Mass Transfer*, Rand Report R 451 PR (1964).
- LUIKOV, A.V.; *Sushka Raspileniyen*; Moscow, Pischepromizdat (1955).
- KAMIJO, M. ET ALL; *Internal representations of neural networks applied to classification of fingerprint images*, 4th. Int. Fuzzy Systems Association World Congress, 4th. **IFSA'91**, Brussels, pp. 73-76, 1991.
- MAEDA, J., ET ALL; *Automatic animation in-betweening using artificial neural network and fuzzy processing*, 4th. Int. Fuzzy Systems Association World Congress, 4th. **IFSA'91**; Brussels, pp 115-118, 1991.
- MARONE, I.YA.; *Design of spray dryers*, **Theor. Found. Chem. Eng. USSR**; Vol 5, pag. 546 (1971).
- MARSHALL, W.R. ; *Atomisation and Spray Drying*, **AIChE Monograph** Ser. No. 2 (1954).
- MARSHALL, W.R.; *Heat and mass transfer in spray drying*, **Trans. ASME** vol. 77, pag. 1377 (1955).
- MASTERS, K.; *Spray Drying*, **Leonard-Hill**, London (1975).
- MCILVRIED, H.G. & MASSOTH, F.E.; *Ind. Eng. Chem. Fundam.*; 12, 225 (1973).
- MIESSE, C.C.; *Ballistic of on evaporating droplet*, **Jet Propul.**; vol. 24, pag. 237 (1954).
- MISRA, O.O. ET ALL; *Heat Transfer* **Jpn Res.**; 1(2), 11 (1972).
- MOCHIDA, T. & KINUTA, Y.; *Jpn J. Chem. Eng. Series*; of 23 papers spanning 1971-1973.
- MONZÓ FUSTER, M., ENRIQUE NAVARRO, J.E.E DE LA TORRE EDO, J.; *Defectos del bizcocho de revestimientos cerámicos por bicocción. (III) Defectos producidos en el*

- prensado*; **Técnica Cerámica**, 157, 450-459, 1987.
- MONZÓ FUSTER, M., ENRIQUE NAVARRO, J.E.E DE LA TORRE EDO, J.; *Defectos de los productos de monococción. (III) Defectos producidos en el prensado y el secado*; **Técnica Cerámica**, 166, 349-400, 1988.
- MUGELE, R.A.; *Maximum stable droplets in dispersoids*, **AIChE J.**; vol. 6, pag. 3 (1960).
- NAKANISHI, S. ET ALL; *Color harmony systems by fuzzy set theory*, 4th. Int. Fuzzy Systems Association World Congress, 4th. **IFSA'91**; Brussels, pp 139-142, 1991.
- NATARAJAN, R.; *Experimental drag coefficients for evaporating and burning drops at elevated pressures*, **Combust. Flame** ; vol. 20, pag. 199 (1973).
- NUKIAMA, S. & TANASAWA, A.: *Trans. Soc. Mech Eng. Jpn*, 4 (13), 86 (1938).
- OKUDA, T.; TANAKA, H. & ASAI, K.; *A formulation of Fuzzy decision problems with fuzzy information, using probability measures of fuzzy events*, **Information and Control** 38(2) 135-147, 1978.
- PADOA, L.; *La cottura dei prodotti ceramici*; **Ed. Faenza Editrici**, Faenza-Italy, 1979.
- PAL, S.K. & MAJUMDER, D.K.; *Fuzzy Mathematical Approach to pattern recognition*; **John Wiley & Sons**; 1986.
- PRADE, H.M.; *Operations Research with fuzzy data*, In: "Fuzzy Sets"(P.P. Wang, S.K. Chang, Eds.) **Plenum Press**, London, 1980.
- PRADE, H. & TESTEMALE, C.; *Generalizing Database Algebre for the Treatment of Incomplete or Uncertain Information and Vague Queries*; **Information Science** Vol.34, pp. 115-143, 1984.
- ____; *Representation of Soft Constraint and Fuzzy Attributes values by means of Possibility Distributions in Databases*; **Ed. Analysis of Fuzzy Information** Vol II. Pp. 213-229 J.C. Bezdek CRC Press, 1987.
- PROBERT, R.P.; *The influence of spray particle size and distribution in the combustion of oil droplest*, **Philos. Mag.**; vol. 37, pag. 94 (1946).
- RANZ, W.E. & MARSHALL, W.R.; *Evaporation from drops*, **Chem. Eng. Prog.**; vol. 48, pag. 141 (1952).
- RANZ, W.E. & MARSHALL, W.R.; *Evaporation from drops at elevated pressures* **Chem. Eng. Prog.**; vol. 48, pag. 173 (1952).
- REAY, D.; *Combustion Theory*, **SPS Publication**; Harwell SAR (1976).
- REAY, D.; *Evaporation of a liquid spray*, **4rd. International Powtech Conference PAC** ; pag. 63, (1977).
- REED, J. & RUNK, R.; *Treatise on materials science and technology*; Vol. 9, Ceramic Fabrication Processes. E. **Academic Press Inc.**, New York, 1976.

- SANO, M. ET ALL; *A simple learning algorithm of handwritten character recognition using fuzzy relation*, 4th. Int. Fuzzy Systems Association World Congress, 4th. **IFSA'91**, Brussels, pp. 183-186, 1991.
- SATO, T.; OGATA, M. & SHIOIRI, S.; *Two models of visual motion processing as revealed by manipulating pattern complexity of random-dot patterns*; **Int. Conf. On Fuzzy Logic & Neural Networks**; Lizuka, Japan, pp. 383-386, 1990.
- SCHLUNDER, E.H.; *PhD Thesis, Technische Hochschule, Darmstadt* (1962).
- SHAPIRO, A.H. & ERICKSON, A.T.; *Chaging size spectrum of particles clouds undergoing evaporation, combustion, or aceleration*, **Trans. ASME**, vol. 79, pag. 775 (1957).
- SIMON, E.J.; *3rd. International Powtech Conference PAC*; p.63, (1976).
- SING, K.S.W.; *Characterization of Powder Surfaces*; **Ed. Academic Press**, London, 1976.
- SJENITZER, F.; *Spray drying*, **Chem. Eng. Sci.**; vol. 1, pag. 101 (1952).
- SJENITZER, F.; *Evaporation of a liquid spray injected in to a stream of gas*, **Chem. Eng. Sci.**; 17, 309 (1962).
- SOO, S.L. ; *Fluid Dinamics of Multiphase Systems*; Blaisdell (1967).
- SPALDING, D.B.; *Spray drying*, **Aeronaut. J.**; 10, 1 (1959).
- SUZUKI, M. & KEEY, R.B.; *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 1455 (1974).
- TAMURA, S., HIGUCHI, S. E TANBA, K.; *Pattern Classification based on Fuzzy Relations*; **IEEE Trans. On Systems, Man and Cibernetics.**, SMC-1, 61-66, 1971.
- TARÍ, M.J.O.; *Sinterizacion de Piezas de Pavimento Gresificado*; Tesis Doctoral - Departament d'Enginyeria Química - **Universidad de Valencia** - España (1991).
- TAUCHI, M. & MASLAND, R.H.; *Motion detection in the retina*; **Int. Conf. On Fuzzy Logic & Neural Networks**; Lizuka, Japan, pp. 451-454, 1990.
- THOMASSON, M.G.; *Finite fuzzy automata, regular Fuzzy languages and Pattern Recognition*; **Journal of Pattern Recognition** 5, 383-390, 1973.
- TOPLEY, B. & WHYTLAW-GRAY, R.; *Philos. Mag.*; 4, 873 (1927).
- TRILLAS, E. ET ALL; *Fundamentos e Introducción a la Ingeniería "Fuzzy"*, **Omron Eletronics S.A.**; Madrid, España, 1994.
- TURBA, J. & NEMETH, J.; *Spray dryer*, **Br. Chem. Eng.**; 9, 157 (1964).
- TURKSEN, I.B. ET ALL; *A pattern matching inference method and its comparison with known inference methods*, 4th. Int. Fuzzy Systems Association World Congress, 4th. **IFSA'91**, Brussels, pp. 231-234, 1991.
- UMANO, M.; *FREEDOM-0: A Fuzzy Database System*, **M.M. Gupta & E. Sanchez eds.**; Fuzzy Information and Decision Processes pp. 339-347, North Holland Pub. Co., 1982.
- ___; *Retrival from Fuzzy Databases by Fuzzy Relational Algebra*; **E. Sanches & M. Gupta eds.**

- Proc. Of IFAC Conference on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Processes pp. 1-5, Marseille, 1983.
- VALVERDE, L. & TRILLAS, E.; *On Modus Ponens in Fuzzy Logic*; **15th Int. Sym. Multi Logics**; Kingston, Canada, 1985.
- VARGAS. V.B., NAVARRO, J.E.E., MALLOL, G. E SÁNCHEZ, E.; *Influence of process variables on the quality of imprevius Tiles*; **Tile & Brick International**, 7(1), 15-22,1991.
- VIEHWEG, H., BIESS, G. & WEBER, B.; *Chem. Technol.*; 20, 355 (1974).
- VIEIRA, M.L.H, *Otimização de massas cerâmicas grés utilizando a metodologia Taguchi*; Dissertação de Mestrado - **Universidade Federal de Santa Catarina**, 1991.
- WILLIAMS, F.A.; *Combustion Theory*; **Addison-Wesley**, London (1965).
- YAMABA, K. & MIYAKE, Y.; *Image processing systems for color objects with gloss using Fuzzy set Theory*; **Int. Conf. On Fuzzy Logic & Neural Networks**; Lizuka, Japan, pp. 413-417, 1990.
- YARON, I. & GAL-OR, B.; *Convective mass or heat transfer from size-distributed drops, bulbes, or solid particles*; **Int. J. Heat Mass Transfer**; vol. 14, pag. 727 (1971).
- ZADEH, L.A.; *Theory of Fuzzy Sets*; **Encyclopedia of Computer Science and Technology**; Marcel Dekker, 1977.
- ZEMANKOVA-LEECH M. & KANDEL,A.; *Fuzzy Relational Data Bases – A Key to Expert Systems*; **Koln**, 1984.

ANEXO 1

DOCUMENTAÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE POR LÓGICA DIFUSA EMPREGADO NA SECAGEM POR ATOMIZAÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS:

Source file: "D:\TESE\13-08-99\Controle Difuso do Atomizador.vee"
 File last revised: Mon Sep 06 11:22:42 1999
 Date documented: Mon Sep 06 11:23:12 1999
 VEE revision: 4.01
 Execution mode: Compiled
 Convert Infinity on Binary Read: no

I/O Configuration
 My configuration
 HP-IB7
 dmm(hp34401a@(NOT LIVE))

Panel Driver: hp34401a.cid
 Timeout (sec): 5.000000
 Byte ordering: MSB
 dvm(hp3478a@(NOT LIVE))
 Panel Driver: hp3478a.cid
 Timeout (sec): 5.000000
 Byte ordering: MSB
 fgen(hp3325b@(NOT LIVE))
 Panel Driver: hp3325b.cid
 Timeout (sec): 5.000000
 Byte ordering: MSB
 funcgen(hp33120a@(NOT LIVE))
 Panel Driver: hp33120a.cid
 Timeout (sec): 5.000000
 Byte ordering: MSB
 oscscope(hp54600@(NOT LIVE))
 Panel Driver: hp54600.cid
 Timeout (sec): 5.000000
 Byte ordering: MSB
 scope(hp54504a@(NOT LIVE))
 Panel Driver: hp54504a.cid
 Timeout (sec): 5.000000
 Byte ordering: MSB
 Serial9
 serial(@ (NOT LIVE))
 Timeout (sec): 0.000000
 Byte ordering: MSB

M: Main

Device Type : Main
 Context is secured : off
 Trig mode : Degrees
 Popup Panel Title Text : Untitled
 Show Popup Panel Title : on
 Show Popup Panel Border : on
 Popup Moveable : on
 Popup Panel Title Text Color : Object Title Text
 Popup Panel Title Background Color : Object Title
 Popup Panel Title Text Font : Object Title Text
 Delete Globals at Prerun : on

M.16: Main/Umidade na saída do atomizador

Device Type : Formula
 Input pin 1 : low (Any, Any)
 Input pin 2 : high (Any, Any)
 Output pin 1 : Result
 Formula : random(low, high)

M.18: Main/Valor Máximo

Device Type : Constant
 Output pin 1 : Real
 Wait For Event : off
 Auto execute : off
 Initialize At Prerun : off
 Initialize at Activate : off
 Constant size fixed : off
 Password masking : off
 Real Value : 9

M.19: Main/Valor Mínimo

Device Type : Constant
 Output pin 1 : Real
 Wait For Event : off

Auto execute : off
Initialize At Prerun : off
Initialize at Activate : off
Constant size fixed : off
Password masking : off
Real Value : 4

M.21: Main/Valor Máximo

Device Type : Constant
Output pin 1 : Real
Wait For Event : off
Auto execute : off
Initialize At Prerun : off
Initialize at Activate : off
Constant size fixed : off
Password masking : off
Real Value : 500

M.22: Main/temperatura média no atomizador

Device Type : Formula
Input pin 1 : low (Any, Any)
Input pin 2 : high (Any, Any)
Output pin 1 : Result
Formula : random(low, high)

M.26: Main/Valor Mínimo

Device Type : Constant
Output pin 1 : Real
Wait For Event : off
Auto execute : off
Initialize At Prerun : off
Initialize at Activate : off
Constant size fixed : off
Password masking : off
Real Value : 400

M.29: Main/Vazão média de barbotina

Device Type : Formula
Input pin 1 : low (Any, Any)
Input pin 2 : high (Any, Any)
Output pin 1 : Result
Formula : random(low, high)

M.31: Main/Valor Mínimo

Device Type : Constant
Output pin 1 : Real
Wait For Event : off
Auto execute : off
Initialize At Prerun : off
Initialize at Activate : off
Constant size fixed : off
Password masking : off
Real Value : 0.001

M.33: Main/Valor Máximo

Device Type : Constant
Output pin 1 : Real
Wait For Event : off
Auto execute : off
Initialize At Prerun : off
Initialize at Activate : off
Constant size fixed : off
Password masking : off
Real Value : 0.03

M.38: Main/(°C)

Device Type : Thermometer
Input pin 1 : Data (Real, Scalar)
Clear At Prerun : on
Clear at Activate : on
Low Limit : 410
High Limit : 480
Value Range : 400 500

M.39: Main/Umidade (%)

Device Type : Meter
Input pin 1 : Data (Real, Scalar)
Clear At Prerun : on
Clear at Activate : on
Value Range : 4 9
Meter Range 1 : 4 9
Meter Range 2 : 4.5 8.5
Meter Range 3 : 5.25 7.75

M.43: Main/Vazão de barbotina (m³/s)

Device Type : Meter
Input pin 1 : Data (Real, Scalar)
Clear At Prerun : on
Clear at Activate : on
Value Range : 0.001 0.03
Meter Range 1 : 0.001 0.03
Meter Range 2 : 0.006 0.024
Meter Range 3 : 0.012 0.018

M.47: Main/Iniciar

Device Type : Start

M.202: Main/Vazão média de ar

Device Type : Formula
Input pin 1 : low (Any, Any)
Input pin 2 : high (Any, Any)
Output pin 1 : Result
Formula : random(low, high)

M.203: Main/Valor Máximo

Device Type : Constant
Output pin 1 : Real
Wait For Event : off
Auto execute : off
Initialize At Prerun : off
Initialize at Activate : off
Constant size fixed : off
Password masking : off
Real Value : 0.9

M.204: Main/Valor Mínimo

Device Type : Constant
Output pin 1 : Real
Wait For Event : off
Auto execute : off
Initialize At Prerun : off
Initialize at Activate : off
Constant size fixed : off
Password masking : off
Real Value : 0.1

M.205: Main/Vazão de ar (m³/s)

Device Type : Meter
Input pin 1 : Data (Real, Scalar)
Clear At Prerun : on

Clear at Activate : on
 Value Range : 0.1 0.9
 Meter Range 1 : 0.1 0.9
 Meter Range 2 : 0.2 0.8
 Meter Range 3 : 0.4 0.6

M.209: Main/Verifica Valor da Umidade e Informa Nova Temperatura

Device Type : Sequencer
 Input pin 1 : U (Any, Any)
 Input pin 2 : T (Any, Any)
 Output pin 1 : Return
 Output pin 2 : Log
 Transactions :
 01. test1 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 0 LE U LT 4 \tPASSOP TGOTO:test1x1 \t//Perigosamente Seco
 02. test2 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 4 LE U LT 4.5 \tPASSOP TGOTO:test2x1 \t//Muito Seco
 03. test3 TESTEX:U \tRANGEEX: 4.5 LE U LT 5.25 \tPASSOP TGOTO:test3x1 \t//Seco
 04. test4 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 5.25 LE U LE 7.75 \tPASSOP TGOTO:test4x1 \t//Normal
 05. test5 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 7.75 LT U LE 8.5 \tPASSOP TGOTO:test5x1 \t//Úmido
 06. test6 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 8.5 LT U LE 9 \tPASSOP TGOTO:test6x1 \t//Muito Úmido
 07. test7 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 9 LT U LE 15 \tPASSOP TGOTO:test7x1 \tFAILOP TERR:10 //Perigosamente Úmido
 08. test1x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:T*1.163 \t//Muito Baixo
 09. test1x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:T*1.088 \t//Baixo
 10. test1x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:T*0.963 \t//Ideal
 11. test1x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:T*0.938 \t//Alto
 12. test1x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:T*0.838 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 13. test2x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:T*1.163 \t//Muito Baixo
 14. test2x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:T*1.063 \t//Baixo
 15. test2x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:T*1.038 \t//Ideal
 16. test2x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:T*0.938 \t//Alto
 17. test2x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:T*0.838 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 18. test3x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:T*1.163 \t//Muito Baixo
 19. test3x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:T*1.063 \t//Baixo
 20. test3x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:T*1.038 \t//Ideal
 21. test3x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:T*0.938 \t//Alto
 22. test3x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:T*0.838 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 23. test4x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:T*1.163 \t//Muito Baixo
 24. test4x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:T*1.063 \t//Baixo
 25. test4x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:T*1.038 \t//Ideal
 26. test4x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:T*0.938 \t//Alto
 27. test4x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:T*0.838 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 28. test5x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:T*1.163 \t//Muito Baixo
 29. test5x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:T*1.063 \t//Baixo
 30. test5x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:T*1.175 \t//Ideal
 31. test5x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:T*1.063 \t//Alto
 32. test5x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:T*0.950 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 33. test6x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:T*1.163 \t//Muito Baixo
 34. test6x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:T*1.063 \t//Baixo
 35. test6x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:T*1.038 \t//Ideal
 36. test6x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:T*0.938 \t//Alto
 37. test6x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:T*0.838 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 38. test7x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:T*1.163 \t//Muito Baixo
 39. test7x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:T*1.063 \t//Baixo
 40. test7x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:T*0.963 \t//Ideal
 41. test7x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:T*0.938 \t//Alto
 42. test7x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:T*0.838 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto

M.211: Main/Temperatura Corrigida (°C)

Device Type : AlphaNumeric
 Input pin 1 : Data (Any, Any)
 Clear At Prerun : on
 Clear at Activate : on

M.212: Main/Verifica Valor da Umidade e da Temperatura e informa nova Vazão de Ar

Device Type : Sequencer

Input pin 1 : U (Any, Any)
 Input pin 2 : T (Any, Any)
 Input pin 3 : A (Any, Any)
 Output pin 1 : Return
 Output pin 2 : Log
 Transactions :
 01. test1 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEEX: 0 LE U LT 4 \tPASSOP TGOTO:test1x1 \t//Perigosamente Seco
 02. test2 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEEX: 4 LE U LT 4.5 \tPASSOP TGOTO:test2x1 \t//Muito Seco
 03. test3 TESTEX:U \tRANGEEEX: 4.5 LE U LT 5.25 \tPASSOP TGOTO:test3x1 \t//Seco
 04. test4 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEEX: 5.25 LE U LE 7.75 \tPASSOP TGOTO:test4x1 \t//Normal
 05. test5 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEEX: 7.75 LT U LE 8.5 \tPASSOP TGOTO:test5x1 \t//Úmido
 06. test6 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEEX: 8.5 LT U LE 9 \tPASSOP TGOTO:test6x1 \t//Muito Úmido
 07. test7 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEEX: 9 LT U LE 15 \tPASSOP TGOTO:test7x1 \tFAILOP TERR:10 //Perigosamente Úmido
 08. test1x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Muito Baixo
 09. test1x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Baixo
 10. test1x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Ideal
 11. test1x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Alto
 12. test1x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 13. test2x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Muito Baixo
 14. test2x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Baixo
 15. test2x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Ideal
 16. test2x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Alto
 17. test2x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 18. test3x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Muito Baixo
 19. test3x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Baixo
 20. test3x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Ideal
 21. test3x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Alto
 22. test3x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 23. test4x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Muito Baixo
 24. test4x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Baixo
 25. test4x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Ideal
 26. test4x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \t//Alto
 27. test4x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*0.963 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 28. test5x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Muito Baixo
 29. test5x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Baixo
 30. test5x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*1.213 \t//Ideal
 31. test5x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*1.213 \t//Alto
 32. test5x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*1.213 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 33. test6x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*1.038 \t//Muito Baixo
 34. test6x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*1.038 \t//Baixo
 35. test6x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*1.038 \t//Ideal
 36. test6x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*1.038 \t//Alto
 37. test6x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*1.038 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto
 38. test7x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Muito Baixo
 39. test7x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Baixo
 40. test7x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Ideal
 41. test7x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Alto
 42. test7x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \tFAILOP TERR:10 //Muito Alto

M.213: Main/Vazão de Ar Corrigida (m³/s)

Device Type : AlphaNumeric
 Input pin 1 : Data (Any, Any)
 Clear At Prerun : on
 Clear at Activate : on

M.214: Main/Verifica Valor da Umidade e da Temperatura e informa nova Vazão de Barbotina

Device Type : Sequencer
 Input pin 1 : U (Any, Any)
 Input pin 2 : T (Any, Any)
 Input pin 3 : A (Any, Any)
 Output pin 1 : Return
 Output pin 2 : Log

Transactions :
 01. test1 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEEX: 0 LE U LT 4 \tPASSOP TGOTO:test1x1 \t//Perigosamente Seco

02. test2 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 4 LE U LT 4.5 \tPASSOP TGOTO:test2x1 \t//Muito Seco
 03. test3 TESTEX:U \tRANGEEX: 4.5 LE U LT 5.25 \tPASSOP TGOTO:test3x1 \t//Seco
 04. test4 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 5.25 LE U LE 7.75 \tPASSOP TGOTO:test4x1 \t//Normal
 05. test5 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 7.75 LT U LE 8.5 \tPASSOP TGOTO:test5x1 \t//Úmido
 06. test6 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 8.5 LT U LE 9 \tPASSOP TGOTO:test6x1 \t//Muito Úmido
 07. test7 LOGEN TESTEX:U \tRANGEEX: 9 LT U LE 15 \tPASSOP TGOTO:test7x1 \tFAILPOP TERR:10 //Perigosamente Úmido
 08. test1x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*0.9 \t//Muito Baixo
 09. test1x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*0.9 \t//Baixo
 10. test1x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*0.9 \t//Ideal
 11. test1x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*0.9 \t//Alto
 12. test1x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*0.9 \tFAILPOP TERR:10 //Muito Alto
 13. test2x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Muito Baixo
 14. test2x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Baixo
 15. test2x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Ideal
 16. test2x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \t//Alto
 17. test2x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*0.938 \tFAILPOP TERR:10 //Muito Alto
 18. test3x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A \t//Muito Baixo
 19. test3x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A \t//Baixo
 20. test3x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A \t//Ideal
 21. test3x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A \t//Alto
 22. test3x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A \tFAILPOP TERR:10 //Muito Alto
 23. test4x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A \t//Muito Baixo
 24. test4x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A \t//Baixo
 25. test4x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A \t//Ideal
 26. test4x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A \t//Alto
 27. test4x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A \tFAILPOP TERR:10 //Muito Alto
 28. test5x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A \t//Muito Baixo
 29. test5x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A \t//Baixo
 30. test5x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*1.125 \t//Ideal
 31. test5x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*1.125 \t//Alto
 32. test5x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*1.125 \tFAILPOP TERR:10 //Muito Alto
 33. test6x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Muito Baixo
 34. test6x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Baixo
 35. test6x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Ideal
 36. test6x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \t//Alto
 37. test6x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*1.063 \tFAILPOP TERR:10 //Muito Alto
 38. test7x1 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 300 LE T LT 400 \tPASSOP TRTN:A*1.1 \t//Muito Baixo
 39. test7x2 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 400 LE T LT 420 \tPASSOP TRTN:A*1.1 \t//Baixo
 40. test7x3 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 420 LE T LE 480 \tPASSOP TRTN:A*1.1 \t//Ideal
 41. test7x4 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 480 LT T LE 500 \tPASSOP TRTN:A*1.1 \t//Alto
 42. test7x5 LOGEN TESTEX:T \tRANGEEX: 500 LT T LE 600 \tPASSOP TRTN:A*1.1 \tFAILPOP TERR:10 //Muito Alto

M.215: Main/Vazão de Barbotina Corrigida (m³/s)

Device Type : AlphaNumeric
 Input pin 1 : Data (Any, Any)
 Clear At Prerun : on
 Clear at Activate : on